

인지 무선환경에서의 다중사용자 스케줄링
기법에 관한 연구 동향 분석

김 준 수

한국산업기술대학교
전자공학부

I. 서 론

주파수 자원을 매체로 사용하는 전통적인 무선통신 시스템은 통신 표준별 또는 통신 객체별로 독립적이고 상이한 주파수 자원을 할당함으로써 혼선과 혼신의 문제를 극복해왔다. 그러나 이러한 배타적인 주파수 자원 할당과 무선통신 시스템의 폭발적 수요 증가는 자연스럽게 주파수 자원의 고갈을 야기하였다. 이를 극복하기 위한 여러 가지 기술적 접근 중 가장 효율적인 방안으로 평가받고 있는 것이 바로 인지 무선(Cognitive Radio, CR) 기술이라 할 수 있다^[1].

한편, 현대 이동통신 시스템에서 순간적인 데이터 전송률을 혁신적으로 향상시키기 위한 가장 중요한 기술적 요소는 다중 사용자 단말 중 기회적으로 소수의 사용자 단말을 선택하여 무선 자원을 집중하는 기회적 스케줄링(opportunistic scheduling) 기법이라 할 수 있다^[2]. 기회적 스케줄링 기법을 통해 기존의 저속 데이터 전송률만으로도 지원 가능한 음성 서비스 위주의 2세대(2G) 이동통신 시스템의 구조를 개선하여 고속의 데이터 서비스가 가능한 3세대(3G) 이동통신 시스템을 가능하게 하였다. 대표적인 3G 시스템으로 유럽 중심 표준인 High Speed Downlink Packet Access(HSDPA)와 북미 중심의 1xEV-DO를 들 수 있으며, 양 시스템 모두 기회적 스케줄링 기법을 적용하고 있다. 또한 4세대(4G) 시스템이라 불리우는 3GPP LTE(Long Term Evolution) 또는 보다 진보된 3GPP LTE-A(LTE-Advanced) 시스템 역시 기회적 스케줄링 기법을 사용한다. 기회적 스케줄링 기법은 서로 다른 다중 사용자 단말이 서로 독립인 무선 채널을 겪

는다는 점을 이용하는 것으로서 매 순간 우수한 채널 환경을 갖는 소수의 사용자 단말을 선택하여 높은 전송률로 데이터를 전송할 수 있도록 하는 기술이라 할 수 있다.

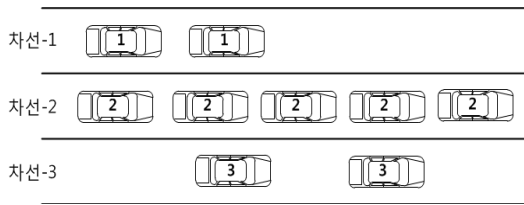
앞서 살펴본 기회적 스케줄링 기법은 많은 양의 데이터를 짧은 시간에 전송할 수 있어 오늘날의 데이터 중심의 이동통신 시스템을 가능하게 한 핵심 기술이며, 인지 무선 기술은 점차 과밀화되고 고갈되어가는 주파수 자원 문제를 극복할 수 있는 주요 기술이다. 따라서 인지 무선 기술과 기회적 스케줄링은 차세대 이동통신 시스템을 위한 두 핵심 키워드가 될 것이 자명하다고 할 수 있다. 본 논문은 인지 무선 기술과 기회적 스케줄링 기법의 접목에 관해 그동안 주요하게 연구되었던 내용을 살펴보고, 앞으로 인지 무선 기술을 이동통신 시스템에 적용하기 위한 방안을 모색한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 다루는 주요 내용인 인지 무선 기법 및 기회적 스케줄링에 대해 소개한다. III장에서 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 시스템이 갖는 이득과 현실적인 문제점과 향후 진행해야할 연구 주제에 대해 논한 뒤 IV장에서 결론을 언급하는 것으로 본 논문을 마무리한다.

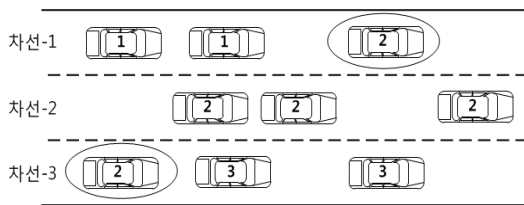
II. 배 경

2-1 인지 무선(CR) 기술

인지 무선 기술의 개념을 [그림 1]과 [그림 2]를 통해 살펴볼 수 있다.



[그림 1] 차선 변경이 불가능한 고속도로



[그림 2] 차선 변경이 가능한 고속도로

[그림 1]과 [그림 2]는 세 개의 차선이 있는 단방향 고속도로를 나타낸다. 두 그림의 차이는 [그림 1]은 차선 변경이 불가능한 경우이고, [그림 2]는 차선 변경이 가능한 경우를 나타낸다. 각 그림에 있는 자동차에는 자신이 달려야 하는 차선이 표시되어 있다. [그림 1]의 경우, 1차선과 3차선에는 자동차가 적은 반면, 2차선에는 매우 많은 차량이 몰려있어 교통 혼잡이 발생하고 있다. 그러나 차선 변경이 불가능하고 각 자동차는 본인에게 할당된 차선만을 달려야 하므로 특정 차선의 과밀화를 해결할 방법이 없다. 반면, [그림 2]는 차선 변경이 가능하므로 차량이 과밀한 2차선상의 차량 두 대를 각각 3차선과 1차선으로 분배하여 전체적으로 교통 혼잡이 발생하지 않도록 하였다. [그림 1]과 [그림 2]의 차선을 주파수 대역으로 자동차를 데이터 패킷으로 바꾸면 [그림 1]은 기존의 무선통신 시스템을, [그림 2]는 인지 무선 시스템의 개념을 예시한다.

무선통신 시스템에서 인지 무선이 가능하도록 하기 위해서는 인접한 주파수 대역에 비어있는 공간이 있는지 알아내는 기능, 해당 주파수에 이미 전송되

고 있는 데이터를 방해하지 않는 기능, 순간적으로 주파수를 변경하는 기능 등이 필요하다. 이러한 세부적인 기술은 다음과 같다.

2-1 주파수 검출(Spectrum Sensing)

주파수 스펙트럼 환경을 검출하여 현재 주파수 사용 현황을 감지한다. 허가 받은 주파수 대역을 사용하는 우선 사용자, 즉 [그림 1]과 [그림 2]의 예에서 차선의 번호와 일치하는 번호는 갖는 자동차들에게 간섭을 발생시키지 않기 위한 필수 기술이다. 검출 방식으로는 정합 필터 방식, 에너지 검출 방식, 신호형태 검출 방식 등이 사용된다.

2-2 주파수 공유(Spectrum Sharing)

한 대역에 허가받은 사용자인 우선 사용자에 대한 간섭 또는 피해를 최소화하면서 주파수를 공유하기 위한 기술로 오버레이(overlay), 언더레이(underlay), 인터위브(interweave) 방식이 있다. 오버레이 방식과 언더레이 방식 모두 우선 사용자가 밴드를 사용하고 있을 때 부 사용자(대역을 잠시 빌려 사용하고자 하는 2차 사용자)도 동시에 대역을 사용할 수 있도록 한다. 이때 오버레이 방식은 부 사용자의 전력 일부를 우선 사용자를 위해 사용하도록 하여(중계하는 방식을 활용) 대역을 빌려 사용하는 것에 대한 비용을 지불하도록 한다. 반면, 언더레이 방식은 부 사용자가 우선 사용자에 미치지 않는 간섭 허용치 이내에서만 대역을 사용할 수 있도록 한다. 오버레이 방식과 언더레이 모두 우선 사용자와 동시에 대역을 사용하므로 어느 정도 우선 사용자에 대한 간섭을 피할 수 없다. 인터위브 방식은 철저한 주파수 검출을 통해 우선 사용자가 대역을 사용하지 않는 동안에만 부 사용자에게 대역 사용을 허가하는 방식이다. 따라서 우선 사용자에 대한 간섭 문제를 해결할 수 있다. 그러나 주파수 검출기의 성능이 완벽하지 않기 때문에, 주

파수 검출 오류가 발생하는 경우 우선 사용자에게 대한 간섭 증가 또는 대역 활용률 저하 등의 문제가 발생할 수 있다³⁾.

2-2 기회적 스케줄링 기법

기회적 스케줄링이란 다중 사용자 단말이 서로 독립적인 시변 채널을 갖는 특성을 활용하는 것으로 매 순간 가장 우수한 채널을 갖는 사용자 단말을 선택하여 데이터를 전송하도록 하여 순간 전송률을 극대화하고, 결과적으로 시스템의 평균 전송률을 향상시키는 기법이다. [그림 3]은 기회적 스케줄링의 예를 보여준다.

[그림 3]의 예는 세 이동 단말(Mobile Station, MS)이 있는 경우를 나타낸다. 그림에서 MS 1, 2, 3은 각각 시변하는(time varying) 무선 채널을 가지고 있으며, 서로 다른 단말의 무선 채널은 서로 독립이다. 따라서 그림에서와 같이 각기 다른 형태로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이때 시스템은 매 순간, 즉 일정한 시간 간격마다 세 단말 중 무선 채널의 값이 가장 큰 단말 한 개를 선택한다. 예를 들어 시스템 동작을 위한 시간 구간이 T0, T1, T2 등과 같을 때 각 시간 구간의 시점에서 가장 우수한 채널 품질을 갖는 사용자 단말은 MS 3, 2, 2 등과 같다. 따라서 기지국과 같은 시스템의 전송단은 매 순간 가장 좋은 채널을 보유한 사용자 단말을 선택해 데이터를 전송하고, 이 과정에서 자연스럽게 순간 전송률을 최대화

할 수 있다. 만약 전체 사용자 단말의 수가 N 개이고, 매순간 채널 상태가 가장 우수한 하나의 단말을 선택해 최대로 데이터를 전송할 경우, 시스템이 가질 수 있는 평균 전송률은 다음과 같다.

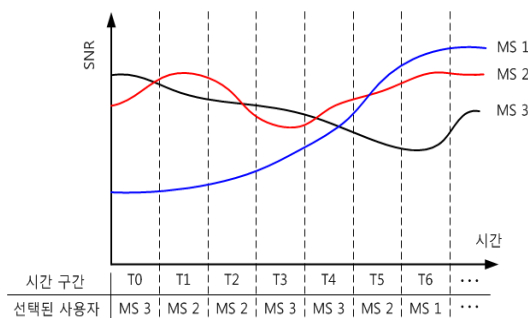
$$R = E[\log_2(1 + \max_{i=1, \dots, N} SNR_i)] \quad (1)$$

위 식에서 $E[\cdot]$ 은 통계적 기댓값을 의미하며, SNR_i 은 i 번째 사용자 단말이 갖는 순간 SNR(Signal to Noise Ratio)이다. 이 식의 결과물로 얻어지는 평균 전송률 R 의 단위는 bps/Hz이다.

따라서 기회적 스케줄링을 통해 식 (1)과 같은 시스템 전송용량을 최대화할 수 있다. 식 (1)은 [그림 3]과 같이 시간 영역을 잘게 나누고, 매 순간 하나의 단말을 선택할 경우 얻을 수 있는 전송 용량으로 오늘날의 LTE 또는 LTE-A와 같이 시간-주파수 영역의 2차원적인 공간에서 사용자를 선택하는 경우 더욱 높은 이득을 얻을 수 있다. 이처럼 다중 사용자 중 소수의 사용자를 선택하여 얻을 수 있는 이득을 multiuser diversity gain(MUD gain)이라 한다. MUD gain의 정량적 정의에 대해서는 뒤에서 다룬다.

III. 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링

본 장에서는 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링에 대한 주요 연구 내용과 동향을 살펴본다. 앞 장에서 기회적 스케줄링을 통해 얻는 이득을 MUD gain이라 정의했다. 따라서 본 장에서 살펴보는 내용은 인지 무선 환경에서 기회적 스케줄링 기법이 얻을 수 있는 MUD gain을 규명하고자 하는 노력의 결과물이라 할 수 있다. 이를 위해 MUD gain을 보다 명확하게 정량화할 필요가 있는데, 본 장의 첫 번째 절에서 MUD gain을 정량화한 뒤 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링이 획득할 수 있는 MUD gain을 살펴본다.



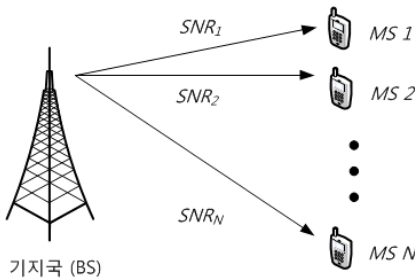
[그림 3] 기회적 스케줄링에 의한 사용자 선택

3-1 MUD Gain

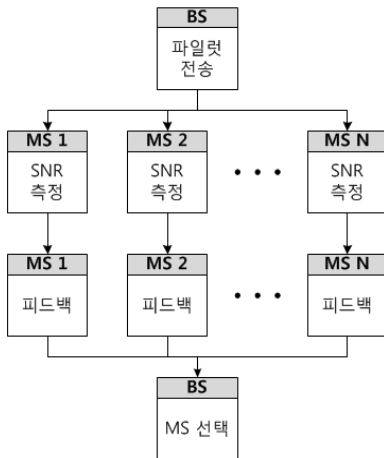
[그림 4]는 인지 무선 환경이 고려되지 않은 기회적 스케줄링 시스템의 예이다.

[그림 4]는 인지 무선 환경이 고려되지 않은 기회적 스케줄링 시스템의 예이다. 이 시스템에는 N 개의 단말이 있고, 각 단말은 기지국과의 무선 채널의 성능, 즉 SNR을 측정하여 기지국으로 피드백한다. 각 단말로부터 피드백을 받은 기지국은 N 개의 SNR 중 가장 높은 SNR을 갖는 사용자 단말을 선택하여 데이터를 전송한다. 이와 같은 절차는 [그림 5]와 같다. 이 시스템에서 얻을 수 있는 전송 용량은 식 (1)과 같다.

식 (1)에서 나타나는 시스템 용량은 N 이 증가할



[그림 4] 기회적 스케줄링 시스템



[그림 5] 기회적 스케줄링 절차

수록 큰 값을 갖게 되는데, 사용자의 수 N 에 대한 시스템 용량의 증가 추이를 MUD gain으로 정의한다. 기존의 여러 연구를 통해 [그림 4]와 같은 환경에서 얻을 수 있는 MUD gain은 다음과 같다는 것이 증명되었다^{[4]-[7]}.

$$R \sim \log_2(\ln N) \tag{2}$$

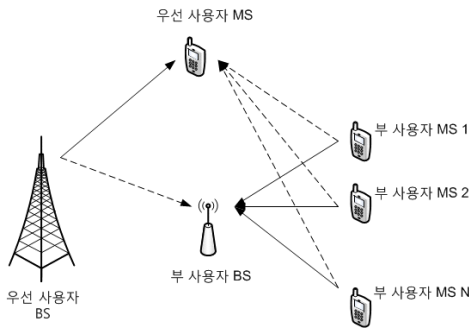
$$R \sim \sqrt{2 \log_2 N} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)은 각각 Rayleigh fading channel과 log-normal shadowing channel 환경을 고려한 것이고, $\ln(\cdot)$ 은 자연 로그이다.

3-2 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링

[그림 6]은 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 시스템의 예를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 우선 사용자를 위해 할당된 대역을 인지 무선 방식으로 활용하고자 하는 부 사용자 시스템이 다중 MS를 갖는 기회적 스케줄링 시스템으로 구성되었다. 기존의 많은 연구에서 서로 다른 시스템 환경을 가정하는데, 대부분 [그림 6]에 나타난 환경을 기반으로 한다. [그림 6]에서 실선은 전송하는 데이터 신호를, 점선은 불필요한 간섭 신호를 나타낸다^{[8]-[10]}.

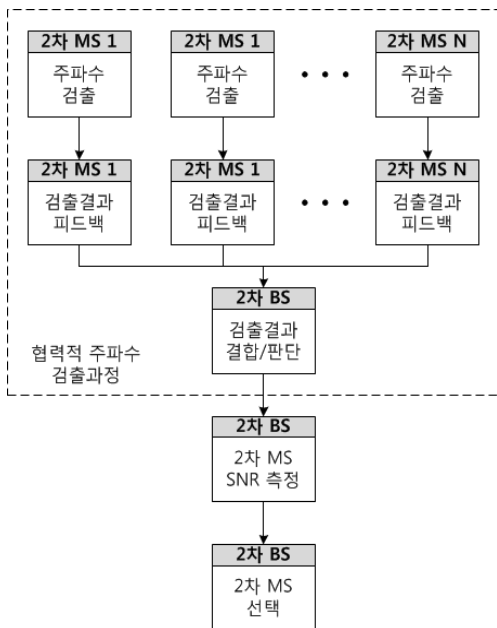
[그림 6]에서 우선 사용자 시스템은 부 사용자 시스템의 동작과 무관하게 데이터를 송수신한다. 이때 부 사용자 시스템은 우선 사용자 시스템에 방해가 되지 않는 조건 하에 동일 대역을 사용할 수 있다. 이를 위해 부 사용자 시스템의 다중 MS들은 개별적으로 우선 사용자 시스템에 대한 주파수 검출을 수행한다. 우선 사용자 시스템과 부 사용자 MS들 간의 무선 채널 환경이 독립적이므로 각 MS가 수행한 주파수 검출의 결과는 서로 다를 수 있다. 각 MS의 주파수 검출 결과는 부 사용자 BS에 피드백되고, 부 사용자 BS는 다중 MS로부터 보고된 주파수 검출 결과를 활용하여 최종적으로 우선 사용자 시스템이 해당 대



[그림 6] 인터위브 모델 지무선 환경에서의 기회적 스케줄링

역을 사용하는지 여부를 판단한다. 이때 우선 사용자 시스템이 대역을 사용하지 않는다고 판단한 경우, 부 사용자 BS는 다중 MS 중 가장 우수한 SNR을 갖는 MS를 선택하여 데이터를 송신하도록 한다. 이 과정을 [그림 7]에 정리하였다.

인지 무선 환경에서 기회적 스케줄링을 적용하는



[그림 7] 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 절차 (2차 시스템은 부 사용자 시스템을 의미함.)

경우, 부 사용자(또는 2차 사용자) 시스템의 성능과 우선 사용자 시스템의 보호 성능은 부 사용자 시스템이 갖는 주파수 검출의 정확도에 크게 좌우된다. 일반적으로 주파수 검출의 성능을 나타내는 척도로 검출 확률(detection probability)과 오경보 확률(false alarm)을 사용한다. 검출 확률은 현재 우선 사용자가 대역을 점유하고 있을 때 이를 정상적으로 감지할 확률을 나타내며, 오경보 확률은 우선 사용자가 대역을 사용하고 있지 않음에도 불구하고 우선 사용자가 있다고 판단할 확률이다.

부 사용자 시스템이 주파수 검출에 실패하면, 즉 우선 사용자가 대역을 점유하고 있음에도 불구하고 대역이 비어있다고 판단하여 부 사용자 단말이 데이터를 전송하면 우선 사용자에 불필요한 간섭을 유발하게 된다. 또한 오경보가 발생하면 대역이 비어 있음에도 불구하고, 대역이 사용 중이라고 판단하여 부 사용자는 데이터를 전송하지 않게 되어 주파수 자원의 낭비를 초래한다. 따라서 주파수 검출은 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다.

한편, 기회적 스케줄링 시스템은 기본적으로 다중 단말을 가지고 있고, 각 단말이 개별적으로 주파수 검출을 수행하므로 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 시스템은 내재적으로 다수의 주파수 검출기를 갖고 있는 것과 같다. 일반적으로 주파수 검출기의 수가 많을수록 검출 성능은 향상된다. 이처럼 다중 주파수 검출기의 결과를 활용하여 종합적인 판단을 내리는 것은 협력적 주파수 검출이라 한다. [그림 7]에서 협력적 주파수 검출 과정을 점선의 상자로 표시하였다. 따라서 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 시스템은 자연스럽게 협력적 주파수 검출 과정을 내포하게 된다.

그러나 앞서 설명한 바와 같이 협력적 주파수 검출 과정을 통해 주파수 검출 성능이 향상되더라도 완벽한 주파수 검출은 불가능하다. 이는 무선 채널의

무작위성에서 기인한다. 따라서 인터위브 방식, 즉 우선 사용자가 대역을 사용하지 않을 때에만 부 사용자에게 대역 사용을 허가는 방식은 완벽하게 운영될 수 없다. 즉, 검출실패 확률이 항상 존재하기 때문에 우선 사용자가 대역을 사용 중이더라도 부 사용자 시스템이 데이터를 전송하기 때문이다. 이러한 경우 언더레이 방식을 함께 사용할 수 있다. 즉, 언더레이 방식이란 우선 사용자와 부 사용자가 동시에 대역을 사용할 수 있도록 하지만, 부 사용자에게 의해 우선 사용자에게 야기되는 간섭량을 일정한 값 이하로 유지하도록 하는 방법이다. 이와 같은 일정하게 유지되어야 하는 간섭량을 간섭온도(interference temperature)라 한다. 간섭온도를 지키기 위해서 부 사용자는 전송 전력을 조절하는 전력 제어(power control) 기법을 함께 활용할 수 있다.

이와 같이 인터위브 방식과 언더레이 방식이 함께 사용되는 경우 얻을 수 있는 MUD gain은 다음과 같다.

$$R \sim c \log_2 N \quad (4)$$

이때, c 는 0과 1사이의 상수로 주파수 검출 성능에 따라 결정되며, 부 사용자 단말의 전송 전력이 무한하다는 가정을 바탕으로 한 결과이다. 일반적인 기회적 스케줄링 시스템에서 얻을 수 있는 MUD gain인 식 (2)와 비교하면 상당히 큰 값을 알 수 있다. 이때 부 사용자 단말의 전송 전력이 유한한 값을 갖는 경우 MUD gain은 다음과 같이 줄어든다.

$$R \sim k \log_2 (\ln N) \quad (5)$$

k 또한 0과 1사이의 상수이다. 식 (2)와 비교하면 주파수 검출 성능에 의해 MUD gain이 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다¹⁸⁾. 또한 [그림 6]의 모델에서 언더레이 모델을 적용했을 때 얻을 수 있는 MUD

gain은 다음과 같다⁹⁾.

$$R \sim \log_2 (W(N)) \quad (6)$$

이때 $W(\cdot)$ 은 Lambert W function으로 부 사용자 단말이 사용할 수 있는 전력이 충분한 경우의 결과이다. Lambert W function은 자연 log 함수와 유사한 정도의 기울기로 증가하는 함수로 언더레이 모델에서 전송 전력이 충분한 경우 식 (2)와 유사한 크기의 MUD gain을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

3-3 향후 연구방향

이상에서 살펴본 바와 같이, 인지 무선과 기회적 스케줄링은 현대 이동통신 시스템의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 또한 서로 상이한 두 기술이 접목되는 경우, 극복해야 할 새로운 문제들이 등장한다. 위에서 언급한 다양한 연구들은 매우 이상적인 환경을 가정하고 있다. [그림 6]에서 실선과 점선들은 각각 데이터 신호와 간섭 신호를 나타내는데, 각 신호는 서로 독립인 무선 채널을 겪는다. 그러나 식 (4)~(6)의 MUD gain은 [그림 6]의 모든 신호에 대한 무선 채널을 실시간으로 정확하게 알고 있어야 한다. 동일한 시스템 내의 신호, 즉 우선 사용자 시스템 내부의 신호 또는 부 사용자 시스템 내부의 신호 채널에 대한 정보 분석은 가능하나, 서로 다른 시스템 간의 무선 채널 정보를 분석하는 것은 매우 복잡하고 어려운 일이다. 따라서 실제 시스템에서 식 (4)~(6)의 MUD gain을 획득하는 것은 어렵다. 따라서 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 시스템을 설계하기 위해서는 보다 상호 간섭 채널 정보를 분석하기 위한 기법의 개발이 필요하다.

또한 인지 무선 환경에서 부 사용자 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 것은 주파수 검출기의 성능이다. 기회적 스케줄링 시스템이 아니더라도 인지 무

선 기술이 현실화되기 위해서는 주파수 검출 성능을 향상시키는 것이 무엇보다 중요하다. 최근 주파수 검출을 사용하지 않고도 인지 무선 기술을 활용하기 위한 제안과 연구가 진행 중이다. 이는 일종의 데이터 베이스를 활용하는 것으로 특정 지역에 대역별로 사용 중인 시스템의 목록을 실시간으로 관리하고, 모든 장치는 특정 대역에 접속하기 전에 데이터베이스를 먼저 참조한 뒤 접속하도록 하여 시스템 간의 충돌을 방지하는 방안이다. 이와 같은 방식은 최근 TVWS(TV White Space) 활용을 위한 현실적 방안으로 제안된 것으로 짧은 시간 안에 인지 무선 기술을 현실화할 수 있는 대안으로 평가된다.

IV. 결 론

현재 4G 이동통신 시스템이 상용화되고 5G 이동통신 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현대 이동통신 시스템은 음성서비스를 위한 이동통신 기술에서 데이터 서비스를 위한 이동통신 기술로 진화하고 있으며, 3G 이동통신 시스템의 개발을 기점으로 본격적인 데이터 서비스가 시작되었다고 할 수 있다. 따라서 2G에서 3G로 전환되는 시기를 이동통신 역사의 패러다임이 전환되는 시기로 볼 수 있는데, 이를 가능하게 했던 기술이 기회적 스케줄링 기법이라 할 수 있다. 또한 4G 시스템이 상용화된 시점에서 4G 시스템보다 1,000배 높은 전송 용량을 갖는 5G 시스템 개발을 위해 극복해야 할 가장 큰 장애물은 주파수 자원의 고갈이다. 많은 연구자들은 주파수 자원의 고갈을 해결하기 위한 핵심 기술로 인지 무선 기술을 주목하고 있다. 따라서 향후 이동통신 기술 분야에서 인지 무선과 기회적 스케줄링은 가장 중요한 두 개의 키워드로 자리 잡을 것이다.

본 논문에서는 그동안 학계에서 이루어진 인지 무선 환경에서의 기회적 스케줄링 기법에 대해 살펴 보았다. 수학적이고 이론적인 부분은 상당부분 제외

하고 개념적으로 다루었으나 결론적으로, 주파수 검출 성능 및 부 사용자 시스템의 가용 전력에 따라 기회적 스케줄링 기법이 획득할 수 있는 MUD gain의 상한선이 결정되고, 이상적인 경우 그 상한선은 인지 무선이 아닌 환경에서의 MUD gain에 근접한다는 것을 확인하였다. 앞으로 남은 과제는 주파수 검출 성능 향상, 무선 채널 정보 분석 기법의 개발 등을 통해 현실적인 환경에서 획득할 수 있는 MUD gain을 향상시키는 시스템을 개발하는 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] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, Jun. 2002.
- [3] S. Srinivasa, S. A. Jafar, "The throughput potential of cognitive radio: A theoretical perspective", *IEEE Communications Magazine*, pp.73-79, May. 2007.
- [4] C. J. Chen, L. C. Wang, "A unified capacity analysis for wireless systems with joint multiuser scheduling and antenna diversity in Nakagami fading channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 3, pp. 469-478, Mar. 2006.
- [5] G. Song, Y. Li, "Asymptotic throughput analysis for channel-aware scheduling", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 10, pp. 1827-1834, Oct. 2006.
- [6] Q. Ma, C. Tepedelenioglu, "Practical multi- user

- diversity with outdated channel feedback", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 4, pp. 1334-1345, Jul. 2005.
- [7] W. Choi, J. G. Andrews, "The capacity gain from intercell scheduling in multi-antenna systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 2, pp. 714-725, Feb. 2008.
- [8] J. P. Hong, W. Choi, "Throughput characteristics by multiuser diversity in a cognitive radio System", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 8, pp. 3749-3763, Aug. 2011.
- [9] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-user diversity in a spectrum sharing system", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 102,106, Jan. 2009.
- [10] J. Kim, Y. Shin, T. W. Ban, and R. Schober, "Effect of spectrum sensing reliability on the capacity of multiuser uplink cognitive radio systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 9, pp. 4349-4362, Nov. 2011.

≡ 필자소개 ≡

김 준 수



2001년 2월: 한국과학기술원 전자전
산학과 (공학사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전자전
산학과 (공학석사)

2009년 1월: 한국과학기술원 전자전
산학과 (공학박사)

2011년 9월~현재: 한국산업기술대

학교 전자공학부 조교수

[주 관심분야] Radio resource management