
비례공정 스케줄링을 적용한 인지무선 채널할당방식

이주현* · 박형근**

Cognitive Radio Channel Allocation using the Proportional Fair Scheduling

Juhyeon Lee* · Hyung-Kun Park**

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아
수행된 기초연구사업임(2011-0021164)

요 약

인지라디오 네트워크는 현재 주파수 사용 현황을 인지하여 허가받은 주 사용자가 사용하지 않는 채널을 통해 데이터 통신을 하는 기술로써, 이러한 유휴 채널을 효율적으로 이용하기 위해서는 스펙트럼 할당 기술이 중요하다. 하지만 인지라디오 네트워크는 기존의 네트워크와는 달리 사용가능한 스펙트럼이 유동적이므로 자원 할당 시 이러한 자원 변화를 효율적으로 활용할 필요가 있다. 본 논문에서는 인지라디오 사용자들 간의 공정성과 시스템 수율을 동시에 만족시키기 위해 비례공정 채널할당기법을 적용하였다. 이때 유동적인 인지라디오 채널 변화를 고려하여 인지라디오 네트워크의 사용자 간섭 확률을 줄일 수 있도록 기존의 스케줄러를 수정한 스펙트럼 할당기법을 제안하였다.

ABSTRACT

Cognitive radio technology enables us to utilize the extra spectrum which is not used by the primary users by sensing the channel condition. To use such an extra spectrum, spectrum allocation is one of the important issues in the cognitive radio networks. The network is dynamic and the available channels are changeable, and the opportunistic channel allocation is required to use the resource efficiently without interference to the primary networks. In this paper, modified proportional fairness scheduling is proposed for cognitive radio networks to satisfy the both fairness and system throughput, and the modified scheduling was designed to reduce the interference to the primary users.

키워드

인지라디오, 비례공정스케줄링, 채널할당, 중앙집중형 네트워크

Key word

cognitive radio, proportional fair scheduling, channel allocation, centralized network

* 정회원 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 박사과정
** 중신회원 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 부교수
(교신저자, hkpark@kut.ac.kr)

접수일자 : 2012. 04. 02

심사완료일자 : 2012. 05. 14

I. 서 론

현재 무선통신시스템 및 무선통신서비스의 발전에 따른 무선자원의 요구가 급증함에 따라 주파수 스펙트럼자원의 부족이 심화되고 있다. 이와 같은 주파수 자원 부족에 대처하기 위한 다양한 기술이 개발 중에 있으며 그 중에서 기존의 전파환경과 양립하면서 통신하는 인지라디오(CR : Cognitive Radio) 기술은 부족한 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 미래 무선통신의 핵심기술로 기대되고 있다. 인지라디오 네트워크는 현재 사용되고 있는 주파수 스펙트럼의 유휴공간을 찾아내어 기존의 주 사용자(primary user)에 대한 간섭을 최소화 하면서 이를 통신에 이용하는 기술이다.

주 사용자에 대한 간섭을 최소화하기 위해서는 스펙트럼을 센싱하여 정확히 유휴채널을 찾아내고 이를 인지라디오사용자에게 할당하는 채널센싱기술과 채널할당기술이 중요한 요소기술이 되고 있다. 이 중에서도 스펙트럼 할당 기술은 시간에 따라 변화하는 채널 환경을 스펙트럼 센싱결과를 바탕으로 효율적으로 이용하기 위한 기술로써 인지라디오를 통해 주파수 부족 현상을 해결하기 위한 핵심 기술이라 할 수 있다. 인지라디오 네트워크에서 자원 할당 문제는 예측할 수 없는 주 사용자의 활동으로 사용 가능한 자원이 유동적이고 주 사용자에 대한 간섭이 없어야 한다는 점에서 기존의 방식과는 차이가 있다. 따라서 인지라디오 네트워크에서의 자원 할당은 이러한 유동적인 스펙트럼 자원 변화를 효율적으로 활용하여 네트워크 수율을 최대화 하는 것이 중요하다[1].

인지라디오 네트워크에서는 주 사용자로 인해 동적으로 변하는 유휴 채널에 대응해 시스템 성능을 향상시킬 수 있는 채널 할당 기법이 많이 연구되고 있다. 이를 위한 연구로는 시스템 처리율을 최적화하는 기법이 많이 제안되었으며, [2]에서는 이와 관련해 멀티채널환경에서 중앙 집중형의 스펙트럼 할당방식이 제안되었다. 또한 [3], [4]에서는 주 사용자에 대한 간섭을 일정 수준으로 유지할 때 인지라디오 네트워크의 수율을 최대화하기 위한 스펙트럼 및 파워 할당에 관해 연구 되었다. 이와 같이 현재까지의 자원할당에 관한 연구는 인지라디오 네트워크 수율을 최대화 하는데 많이 진행되어 있는 상태인데, 본 논문에서는 수율뿐만이 아니라 사용자

간의 공정성도 함께 고려하고자 기존의 스케줄링 방식 중 하나인 비례공정 (PF : Proportional Fairness) 채널할당 방식[5]을 활용하고자 한다.

비례공정 스케줄링은 시스템 수율과 사용자간 공정성을 함께 고려한 대표적인 스케줄링 알고리즘으로 들 수 있다. 비례공정방식은 기본적으로 각 사용자의 채널 상태 및 전송 데이터율을 파라미터로 하여 높은 스케줄링 값을 가지는 사용자에게 우선적으로 자원을 할당해주는 방식이다. 그러나 이 방식을 인지라디오 시스템에 그대로 적용할 경우 주 사용자의 채널 사용 패턴이 유동적인 인지라디오 채널의 특성상 채널 상태가 좋은 채널이 할당되더라도 주 사용자가 해당 채널을 사용할 경우 해당 채널 사용을 중지하게 되고 이는 인지라디오 시스템 수율의 성능 하락으로 이어지게 된다. 따라서 비례공정방식을 인지라디오 네트워크에 적용하기 위해서는 유동적인 채널 환경을 고려할 필요가 있다.

본 논문에서는 사용자간의 공정성 및 시스템 수율을 동시에 만족시키는 대표적인 방법인 비례공정방식을 인지라디오 네트워크에 적용한 사용자 스케줄링 및 스펙트럼 할당 기법을 제안하고자 한다. 인지라디오 네트워크는 기존 네트워크와 구별되는 인지라디오 네트워크의 특성인 주 사용자에 대한 통신 보호, 동적인 채널 변화, 및 멀티채널 환경 등으로 인하여 기존의 비례공정방식을 그대로 적용하게 되면 충분한 성능을 얻지 못한다. 따라서 인지라디오 네트워크 특성을 고려하여 각 채널이 유휴 상태일 확률 및 채널이 다른 상태로 변화할 확률 등을 추가적으로 고려한 채널 스케줄링 기법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 본 연구에서 고려한 시스템에 대해 설명한 후 III장에서 인지라디오 네트워크를 위한 스펙트럼 할당 기법을 소개하고 이에 대한 성능 분석 및 결과를 IV장에서 논의한 다음 V장에서 본 논문에 대한 결론을 내리도록 한다.

II. 시스템 모델

인지라디오 시스템에는 기존의 허가된 사용자인 주 사용자 및 주 사용자가 사용하지 않는 유휴 채널을

opportunistic하게 활용하는 인지라디오 사용자로 구성 되어 있다. 이러한 인지라디오 시스템은 중앙 제어 노드가 인지라디오 네트워크를 관리하는 중앙집중형 시스템과 각각의 인지라디오 노드들이 분산적으로 네트워킹 하는 분산형 시스템으로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 M 개의 인지라디오 사용자로 구성된 중앙집중형 인지라디오 시스템을 가정하였다.

중앙집중형 인지라디오 시스템은 인지라디오 네트워크를 관리하는 중앙 제어 노드가 존재하는 시스템으로써 IEEE 802.22[6]를 한 예로 들 수 있다. 중앙 제어 노드는 인지라디오 기지국(cognitive base station)으로 역할하며 각 인지라디오 노드들의 채널 센싱 결과를 바탕으로 제어 채널을 선택하고, 데이터율, 전송파워, 각 노드들의 스펙트럼 센싱 스케줄 및 스펙트럼 할당 등과 같은 인지라디오 네트워크 관련 파라미터들을 조절한다 [1],[7].

본 논문에서 인지라디오 스펙트럼은 K 개의 채널로 나누어져 있으며 각 채널의 주 사용자 사용 빈도는 일정한 확률분포를 따른다고 가정하였다. 인지라디오 네트워크는 이러한 K 개의 채널을 주기적으로 센싱하여 사용 가능한 채널을 데이터 전송에 활용한다. CR기지국은 최대 K 개의 채널을 통해 동시에 데이터 송신 및 수신 가능하며, 각 채널은 시간 구간 당 하나의 인지라디오 사용자만 사용 가능한 것으로 가정하였다. 한편 각 인지라디오 사용자는 복수의 인지라디오 채널을 통한 데이터 전송이 가능하다.

CR기지국은 매 센싱 주기마다 인지라디오 사용자를 통해 각 채널에 대한 채널 센싱정보를 수집하여 가용채널 및 주 사용자 출현을 감지한다. 이때 센싱 결과로 수집된 각 채널의 유희성 여부를 이진 형태로(On일 경우 1, off일 경우 0) 최대 N 개 까지 저장하며, 이러한 채널 이력정보는 매 센싱 주기마다 갱신된다.

또한 인지라디오 사용자는 타임슬롯마다 out of band 제어채널을 통해 각 채널에 대한 채널 상태 정보 전송하며, CR 기지국은 채널 센싱을 통한 가용채널 정보 및 각 사용자의 채널 상태 등을 고려하여 사용자 스케줄링 및 채널 할당을 하게 된다. 이를 그림으로 도식할 경우 그림 1과 같다.

이때 제어채널로 전송되는 제어 정보는 에러가 없는 경로 가정하였다.

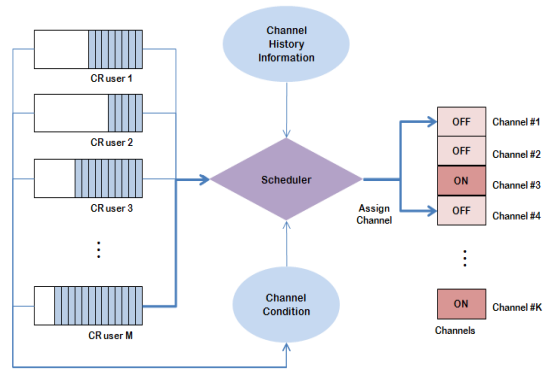


그림 1. CR 기지국에서의 자원할당 시스템
Fig. 1 Resource allocation in the CR base station

III. 제안하는 스펙트럼 할당 기법

본 장에서는 먼저 기존의 비례공정 스케줄링 알고리즘을 소개한 뒤, 인지라디오 네트워크의 채널 특성을 고려하여 수정된 비례공정 알고리즘 및 이를 이용한 다중 채널 할당 기법을 제안하고자 한다.

3.1. 비례공정(PF: Proportional Fairness)알고리즘

비례공정 채널할당방식은 아래와 같이 사용자의 채널상태 및 현재까지 전송된 평균 데이터 전송률을 고려함으로써 시스템 수율 및 각 사용자에 대한 공정성을 함께 보장하는 알고리즘이다.

$$i^* = \arg \text{MAX}_i \left(\frac{C_i(t)}{R_i(t)} \right) \quad (1)$$

$C_i(t)$ 는 사용자 i 의 현재 채널 상태, $R_i(t)$ 는 사용자 i 의 전송된 데이터의 평균 전송률을 뜻한다. 매 채널 할당이 끝나면 $R_i(t)$ 는 아래와 같이 갱신 된다.

$$R_i(t+1) = \begin{cases} (1 - \frac{1}{t_c})R_i(t) + \frac{1}{t_c} C_i(t), & i = i^* \\ (1 - \frac{1}{t_c})R_i(t), & i \neq i^* \end{cases} \quad (2)$$

여기서 tc 는 저역필터의 **averaging factor**이다. 비례공정 채널할당방식은 채널 활용도 및 사용자간 공정성 제공에 있어 검증된 알고리즘이지만, 이를 인지라디오 시스템에 그대로 적용할 경우 주 사용자의 채널 사용 패턴이 유동적인 인지라디오 채널의 특성상 채널 상태가 좋은 채널이 할당되더라도 주 사용자가 해당 채널을 사용할 경우 해당 채널 사용을 중지하게 되고 이는 인지라디오 채널의 활용도를 떨어뜨리게 된다. 따라서 본 장에서 각 인지라디오 채널의 유휴 확률 및 변화율을 고려하여 수정된 비례공정 채널할당 알고리즘 및 이를 이용한 다중 채널 할당 기법을 제안하고자 한다.

3.2 인지라디오 네트워크를 위해 개선된 비례공정 채널할당 알고리즘

인지라디오 네트워크에 적용하기 위한 비례공정 알고리즘은 기본적으로 과거 N 개의 채널 온오프 이력정보를 이용하여 인지라디오 채널의 경향을 유휴 확률 (Idle Channel Rate) 및 변화율(Channel Shifting Rate) 등 크게 두 가지로 분류하여 파라미터를 산정하였고, 이를 기존 비례공정 알고리즘에 적용하였다.

주 사용자 채널의 특성을 나타내는 파라미터 정의의 위해 우선 주 사용자 채널을 그림2와 같은 두 가지 케이스로 나누어 보았다. 첫 번째 케이스는 단위 구간동안 주 사용자 채널의 IDLE한 비율이 다른 경우이다.

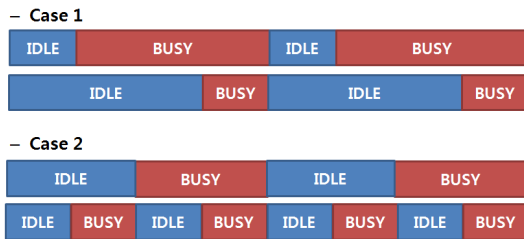


그림 2. 인지라디오 네트워크에서의 2가지 채널 패턴
Fig. 2 Two patterns in the CR networks

이 경우 IDLE 구간의 비율이 높은 채널이 전송 시 주 사용자에게 간섭을 일으킬 확률이 낮으므로 비율이 높은 채널을 선택하는 것이 좋을 것이다. 한편 단위 구간동안 IDLE 구간이 비율이 같지만 상대적으로 채널상태가 IDLE에서 BUSY 채널로 변화하는 정도가 많은 채널이 있을 수 있다. 두 번째 케이스가 이런 상황을 보여주고

있으며 이 경우 상대적으로 채널 상태가 변화하는 정도가 적은 채널을 선택하는 것이 주 사용자에게 대한 간섭을 일으킬 확률을 줄일 수 있을 것이다.

따라서 위의 두가지 주 사용자 채널의 특성을 반영하는 파라미터를 각각 I_j 와 S_j 로 정의하였으며 이는 아래와 같다.

채널의 유휴 확률 I_j 는 전체 시간 구간동안 채널 j 가 유휴 상태일 확률을 의미하며 평균 idle 구간 길이와 비례하며 아래와 같이 정의된다.

$$I_j = \frac{E[T_0^j]}{E[T_1^j] + E[T_0^j]} \quad (3)$$

변수 T_1^j 는 채널 j 의 history $H_{j(t)}$ 에서 연속적인 1의 길이, T_0^j 는 채널 j 의 history $H_{j(t)}$ 에서 연속적인 0의 길이를 의미한다. $H_{j(t)}$ 는 센싱주기(또는 채널의 time slot) t 마다 채널의 유휴 상태 여부를 나타내며 채널이 유휴상태일 경우 0, 주 사용자가 사용하는 상태일 경우 1로 나타내고, 총 N 의 길이를 가진다. 채널의 변화의 S_j 는 채널이 ON 상태에서 OFF 상태, 또는 OFF 상태에서 ON상태로 변화될 확률을 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$S_j = \frac{\sum_{t=0}^{N-1} |H_j(t+1) - H_j(t)|}{N} \quad (4)$$

위에 정의된 두 파라미터 I_j 및 S_j 는 매 시간슬롯마다 갱신되어 동적으로 변화하는 인지라디오 채널 상황을 반영하게 된다. 이를 적용하여 수정된 비례공정 채널할당 알고리즘은 다음과 같다.

$$(i^*, j^*) = \arg \max \frac{C_{ij}(t) \{1 + \alpha(I_j(t)/S_j(t))\}}{R_i(t)} \quad (5)$$

$C_{ij}(t)$ 는 인지라디오 사용자 i 에 대한 채널 j 의 채널 상태를 의미하며, $R_i(t)$ 는 사용자 i 가 현재까지 전송한 데이터율을 의미하고 식 (2)에 따라 갱신된다. α 는 파라미터 I_j 및 S_j 에 대한 가중치이다. 채널의 유휴

확률 I_j 가 높을수록 주 사용자가 해당 채널을 사용할 확률이 비교적 적어지므로 주 사용자에 대한 간섭 확률도 줄어들게 된다. 하지만 주 사용자가 짧은 시간동안 자주 채널을 사용할 경우 유휴 채널 확률 I_j 가 높더라도 주 사용자 간섭 확률이 높아질 수 있는데, 이를 위해 채널 변화율 파라미터 S_j 를 함께 적용하여 유휴 채널 확률이 같을 경우 비교적 유휴 구간이 긴 채널이 우선적으로 할당될 수 있도록 하였다. 예를 들어 $H_1(t) = \{1010101010\}$, $H_2(t) = \{1111100000\}$ 일 경우 두 채널의 유휴 채널 확률은 1/2로 동일하지만 채널 변화율 S_j 는 채널 1이 더 높으므로, 이를 스케줄러에 적용할 경우 다른 조건이 동일하다고 가정했을 때 채널 2가 더 우선적으로 할당되게 된다.

IV. 성능분석 및 결과

시뮬레이션을 위해 1km 반경의 셀에서 균일하게 분포된 고정 인지라디오 사용자들을 가정하였다. 각 인지라디오 채널들은 특정한 주 사용자 출현 빈도를 가진 지수확률분포를 가지고, 각 채널의 평균 서비스 시간은 30초로 동일하게 설정하였다. 관련 파라미터 및 트래픽 패턴은 표와 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Simulation parameters

Parameter	Value
cell radius	1,000m
simulation time	180,000slots
slot length	20 ms
averaging factor for PF(tc)	1,000 slots
packet length of CR user	1024 bits
Length of history function H(t)	1,000 slots
# of Channels	12
# of CR users	12

성능분석을 위해 기존의 비례공정 방식과 평균 시스템 throughput 및 주 사용자와 충돌율을 비교하였다. 여기서 충돌은 패킷 전송 중 주 사용자가 출현하여 패킷 전송이 취소된 상황을 의미하며, 충돌율은 전체 전송된

패킷에 대한 전송이 취소된 패킷의 개수를 비율로 나타낸 것이다. 또한 그래프에서 채널 로드(Channel Load)로 표현된 트래픽 로드는 주 사용자 도착률 / 주 사용자 서비스율로 계산된다. 주 사용자 도착율은 주 사용자가 채널에 출현하는 빈도를 나타내며, 주 사용자 서비스율은 주 사용자가 연속적으로 채널을 차지하는 시간구간 길이의 역수이다. 본 시뮬레이션에서는 주 사용자 서비스율은 각 채널별로 일정한 상태에서 주 사용자 도착율을 채널 별로 편차를 두어 채널간 트래픽로드의 변화를 주었다.

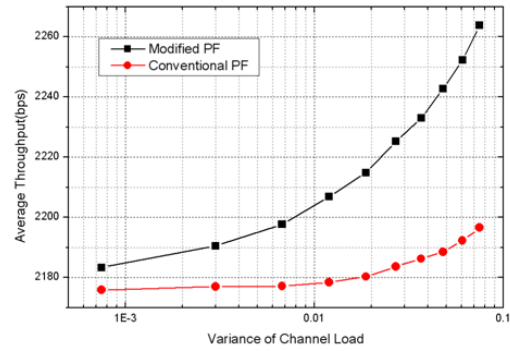


그림 3. 트래픽로드 편차에 따른 throughput 성능
Fig. 3 Throughput according to the variance of traffic load

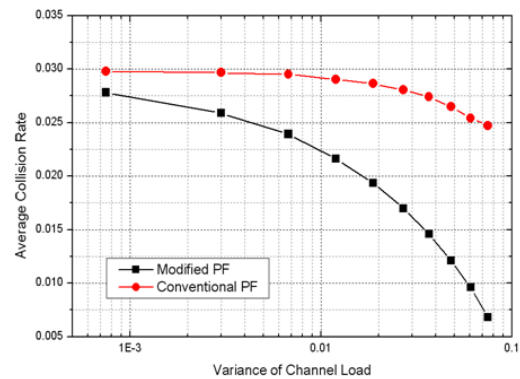


그림 4. 트래픽로드 편차에 따른 충돌율
Fig. 4 Collision rate according to the variance of traffic load

그림 3 및 그림 4는 각 채널 간 트래픽 로드의 편차를 증가시켰을 때의 평균 시스템 throughput 및 충돌율을 나

타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 채널간의 트래픽 로드의 편차가 커질수록 유휴채널의 비율이 높아지기 때문에 두 알고리즘 모두 성능이 나아지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 주 사용자 트래픽 특성을 고려한 수정된 비례공정 채널할당 알고리즘이 주 사용자 트래픽 변화에 훨씬 더 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 한편 기존 비례공정 채널할당 알고리즘의 경우 유휴 채널 비율이 높아짐에 따른 약간의 성능변화가 있지만 그 차이가 미미하다고 볼 수 있으며, 채널 간 주 사용자 트래픽 차이가 커질수록 제안한 알고리즘이 훨씬 더 나은 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5 및 그림 6은 각 채널 간 트래픽 로드의 편차를 0.001으로 고정시킨 상태에서 모든 채널의 트래픽로드를 증가시켰을 때의 평균 시스템 throughput 및 충돌률을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 채널의 트래픽로드가 증가할수록 주 사용자의 트래픽이 증가하여 유휴채널의 비율이 낮아지게 된다. 따라서 주 사용자에 간섭을 일으킬 확률이 증가하여 두 알고리즘 모두 throughput과 충돌률 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 경우에도 제안한 알고리즘이 기존의 방식에 비해 지속적으로 더 나은 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

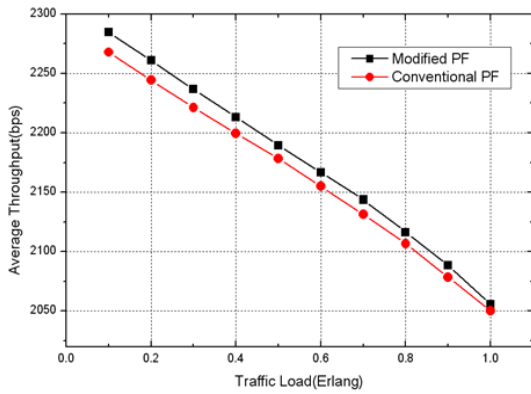


그림 5. 트래픽로드의 증가에 대한 throughput 성능
Fig. 5 Throughput according to traffic load

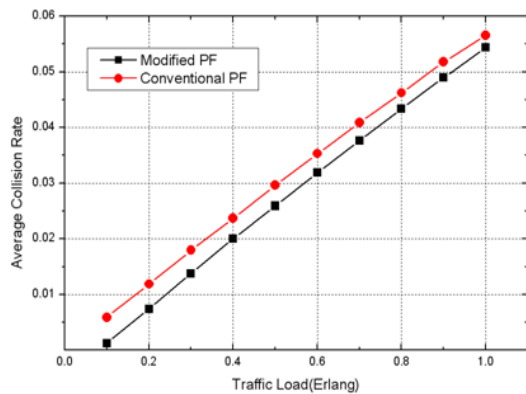


그림 6. 트래픽로드의 증가에 대한 Collision Rate
Fig. 6 Collision rate according to the traffic load

V. 결 론

본 논문에서는 중앙 집중방식의 인지라디오 시스템에서 인지라디오 사용자의 자원할당을 위한 수정된 비례공정 채널할당 알고리즘을 제안하였다. 수정된 알고리즘에서는 기존의 방식에 각 채널의 주 사용자 트래픽 특성을 나타내는 평균 유휴구간 길이 및 채널의 온오프 변화율을 추가로 고려하였다. 시뮬레이션을 통해 주 사용자 트래픽을 고려함으로써 인지라디오 시스템에서의 자원할당 성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었으며, 특히 채널 간 주 사용자 트래픽 특성의 차이가 클수록 성능 향상의 폭이 더 커짐을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0021164)

참고문헌

- [1] Shin, K.G., Hyoil Kim, Min, A.W., Kumar, A., "Cognitive radios for dynamic spectrum access: from concept to reality", *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 17, Issue 6, pp.64 - 74, December 2010.

- [2] Peng Wang, Matyjas, J., Medley, M, "Joint spectrum allocation and scheduling in multi-radio multi-channel cognitive radio wireless networks", IEEE Sarnoff Symposium, 2010.
- [3] Anh Tuan Hoang, Ying-Chang Liang, Md Habibur Islam, "Power Control and Channel Allocation in Cognitive Radio Networks with Primary Users' Cooperation", IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol. 9, No. 3, March 2010.
- [4] H. Kim and K. G. Shin, "Asymmetry-Aware Real-Time Distributed Joint Resource Allocation in IEEE 802.22 WRANs", Proc. IEEE INFOCOM, March 2010.
- [5] A. Jalali, R. Padovani, and P. Pankaj, "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," Proc. IEEE VTC, pp.1854-1858, May 2000.
- [6] Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, Dagnachew Birru, Sai Shankar N, "IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios," Journal of Communications, Vol. 1, No. 1, pp.38-47, April 2006.
- [7] Chowdhury, Kaushik R ., "A survey on MAC protocols for cognitive radio networks," Ad Hoc Networks, Vol. 7, Issue 7, pp. 1315-1329, September 2009.



박형근(Hyung-Kun Park)

1995년 2월 고려대학교
전자공학과 (공학사)
1997년 2월 고려대학교
전자공학과 (공학석사)

2000년 8월 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 9월 ~ 2001년 8월: University of Colorado at Colorado Springs, Postdoc.
2001년 9월 ~ 2004년 2월: 현대시스콤, 선임연구원
2004년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교
전기전자통신공학부 부교수
※ 관심분야: 인지무선통신, USN, 무선자원관리

저자소개



이주현(Juhyeon Lee)

2006년 2월 한국기술교육대학교
정보기술공학부 (공학사)
2010년 2월 한국기술교육대학교
전기전자공학과 (공학석사)

2010년 3월 ~ 현재: 한국기술교육대학교
전기전자통신공학과 박사과정
※ 관심분야: 인지무선통신, 무선자원관리