

논문 2009-46TC-12-11

간섭온도 기반의 다중 Cognitive Radio 사용자를 위한 주파수 공유 방안

(Interference Temperature based Frequency Sharing Scheme for
Multiple Cognitive Radio Users)

김 승 왕*, 김 혜 령*, 최 상 호*

(Seung Wang Kim, Hye Ryeong Kim, and SangHo Choe)

요 약

본 논문에서는 미국 FCC에서 최근 소개한 수신기 중심적 간섭 메트릭 (receiver-centric interference metric)인 간섭온도 (interference temperature (IT)) 기반의 간섭해석모델과 이에 기반을 둔 주파수 공유 기법을 검토·제안한다. 기존의 단일 cognitive radio (CR) 사용자 (혹은 부사용자, secondary user) 주파수 공유 방안을 실제 다수의 부사용자를 고려한 주파수 공유 방안으로 확장 제시한다. 또한 주사용자 (primary user)가 시간 축 상에 랜덤하게 발생 (ON/OFF)하는 실제 운용환경을 감안한 새로운 간섭온도 모델을 제시하고 이를 이용하여 CR 용량을 정량적으로 분석한다. CR 용량은 시간 축 상의 유휴 슬롯 채널 할당을 위한 순시용량과 순시용량을 평균한 평균용량으로 구분되며 공유절차상에 이를 적절히 이용 채널을 할당한다. 제안된 공유 절차는 기존의 공유 절차와는 달리 주사용자로 부터 별도의 스펙트럼 센싱 정보를 요구하지 않으며 전송속도 및 채널특성에 따라 적응적으로 주파수 파라미터의 변경이 가능하다. 시뮬레이션을 통해 제안한 주파수 공유 절차의 타당성을 검증한다.

Abstract

In this paper, we investigate a spectrum sharing scheme based on the interference temperature (IT), that is a recently introduced receiver-centric metric by FCC. We extend the existing frequency sharing procedure for single CR to the one for multiple CRs (or secondary users, SUs). In the proposed interference model, we consider the practical operating characteristics of primary users (PUs), stochastically activated (ON)/deactivated (OFF) at the time axis, and analyze quantitatively the CR user capacity based on the model. We define the instantaneous capacity for idle time-slot channel allocation and the mean capacity averaging this instantaneous capacity and use them for a proper frequency sharing. Apart from existing schemes, the proposed frequency sharing scheme changes the frequency parameters adaptively depending on the channel characteristics and does not need any sensing information from PUs. Through computer simulation, we verify the proposed model.

Keywords : 무선인지(cognitive radio, CR), 간섭온도, 주파수 공유기법, 스펙트럼 사용률

정희원, 가톨릭대학교, 정보통신전자공학부
(Department of Information, Communications &
Electronics Engineering, The Catholic University of
Korea)

※ 본 논문은 2009년 가톨릭대학교 교내학술연구비, 한국연구재단 (구 한국학술진흥재단)의 지원사업 (KRF-2007-331-D00302) 및 지식경제부 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2009-C1090-0902- 0003)의 연구비 지원으로 수행되었음.

접수일자: 2009년9월23일, 수정완료일: 2009년12월14일

I. 서 론

우리는 현재 일상생활에서 다양한 형태의 무선 통신 서비스를 접하고 있다.

미래 사회는 폭발적인 무선 통신 서비스 수요의 증가가 예측되고 있어 현재에도 거의 포화상태에 이른 주파수 자원의 부족 문제는 더욱더 심각하여질 것이다.

FCC (미국연방통신위원회) 보고서^[1~2]에 따르면 현재 스펙트럼 사용률 (spectrum utilization)을 실제 측정된 결과 6.5% 이내로 매우 저조한 실정이다. 무선인지 (cognitive radio, CR) 기술은 기존의 저조한 스펙트럼 사용률을 획기적으로 높여줄 수 있는 대안으로 인식되고 있으며 이에 따라 최근 많은 연구^[3~6]가 진행 중이다. CR 사용자(부사용자)^[3]는 기존의 라이선스 채널 사용자 (주사용자)와는 달리 별도의 라이선스 채널의 할당 없이 시·공간적으로 주사용자가 사용하지 않고 있는 유휴 라이선스 채널 (idle license channel)을 스펙트럼 센싱 (spectrum sensing)하고 데이터 전송시 이를 이용함으로써 스펙트럼 사용률을 개선시킨다.

FCC 보고서^[1~2]에서 제안한 간섭온도 (interference temperature, IT)는 채널 간섭량을 표시하는 측정지표로 단위는 절대온도 (°K, Kelvin)이다. IT를 이용할 경우 해당 주파수의 전파간섭량을 실시간으로 어디에서든 파악할 수 있어 효과적인 네트워크 내 주파수 관리가 가능하다. 또한 간섭 분석 시 IT를 이용할 경우 기존의 출력을 이용한 송신기 중심적 (transmitter-centric) 방식에서 수신기 중심적 (receiver-centric) 방식으로 패러다임이 변경되며 이는 곧 네트워크 내 효율적인 간섭량 분석은 물론 체계적인 스펙트럼 관리에 기반한 시스템 구축이 가능함을 의미 한다^[4]. 특히 IT 기반 주파수 공유방식은 해당 주파수 채널에 대해 라이선스 사용자의 현재 이용여부에 상관없이 간섭온도가 주사용자 서비스에 영향을 주지 않는 최대 허용 간섭 한계범위 (간섭온도 한계치, IT limit) 이내라면 부사용자의 오버레이를 허용함으로써 주파수 이용률을 효과적으로 높여주게 된다. Clancy^[7]는 확정 채널 (deterministic channel)을 가정 하에 간섭온도 기반의 CR 네트워크 간섭분석 모델을 제시하였고 이를 이용하여 부사용자의 용량을 계산하였다. 문헌 [8]에서는 Clancy 간섭온도 모델을 이용하여 단일 CR 가입자를 위한 주파수 공유 기법과 절차를 제안한다.

본 논문에서는 Clancy 모델^[7]과는 달리 실제로 주사용자의 유휴채널이 주파수 축은 물론 시간 축 상에 발생됨을 고려 기존간섭온도 모델을 확장 제시한다. 부사용자의 주파수 간섭채널 사전정보 유무에 따라 이상적인 간섭모델과 일반적인 간섭모델을 선정하며 선정된 모델을 이용하여 각 채널에서의 CR 용량을 분석한다. CR 용량은 시간 축 상의 주사용자 ON/OFF*에 따라 발생하는 유휴 슬롯 채널의 할당을 위한 순시용량과 이

를 평균한 평균용량으로 구분한다. 본 논문에서는 기존의 단일 부사용자 주파수 공유기법^[8]을 다중 부사용자 주파수 공유기법으로 확장하고 부사용자 (링크)별 데이터 전송속도 요구사항에 따라 대역폭과 송신전력 등 적용적인 파라미터 설정이 가능하다. 제안한 공유 기법의 구체적인 검증을 위한 시나리오를 설정하고 각 시나리오별 시뮬레이션을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 시변 채널하의 새로운 IT 기반 간섭 모델을 확장 제시하고 이를 이용하여 CR 용량을 분석하며, III 장에서는 제안한 간섭 모델에 기반한 다중 부사용자간 주파수 공유 방안을 제시한다. IV 장에서는 제안한 주파수 공유 방안 검증을 위한 시나리오 별 시뮬레이션 결과와 분석을 보여 주고, V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 간섭 모델 및 용량 분석

최근 FCC에서 제안한 간섭온도 (IT)는 네트워크 내 상호간섭 등 각종 주파수 간섭은 물론 시스템 열잡음도 함께 포함한 간섭세기 메트릭으로 단위는 절대온도 (°K, Kelvin)를 사용하며, 다음 식과 같이 정의한다^[7].

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(f_c, B)}{kB} \tag{1}$$

여기서 B와 f_c 는 부사용자 사용채널의 대역폭, 중심 주파수를 각각 나타내고, $P_I(f_c, B)$ 는 수신 안테나에서의 평균 간섭전력, k는 볼츠만 상수를 각각 표시한다^[7]. 부사용자 사용채널은 전 라이선스 스캔 대역 B_i 내에 임의위치에서 발생가능하다고 가정한다. 우선 부사용자의 사용 주파수 대역 $[f_c - B/2, f_c + B/2]$ 내에 중심 주파수가 f_i , 대역폭이 B_i 인 주사용자 신호가 n 개 ($i = 1, \dots, n, n \geq 1$) 존재한다고 가정하자. 이때 부사용자의 송출전력 P는 주사용자에게 간섭을 주지 않기 위해서는 다음 조건식을 만족 하여야 한다^[7].

$$P \leq \min_{i \in [1, \dots, n]} \left(\frac{B_i k}{M} (T_U(f_i) - T_I(f_i, B_i)) \right) \tag{2}$$

식 (2)에서 $T_U(f_i)$ 는 주파수 f_i 에서 간섭온도 제한치 (IT limit)를, $T_I(f_i, B_i)$ 는 중심 주파수 f_i , 대역폭 B_i 에

* ON/OFF란 라이선스 주파수 채널 대역에 일부 혹은 전부가 활성화(active)/유휴(idle)된 상태를 각각 가리킨다.

서 부사용자가 측정 (센싱)한 간섭온도를 각각 나타낸다. M 은 주사용자를 CR 간섭으로부터 보호하기 위해 요구되는 부사용자 (CR 단말기) 최소 운용 이격거리를 나타내는 감쇄 파라미터로 0과 1사이의 값을 갖는다^[9]. 만일 부사용자의 최대 송출 전력을 ρ 라고 할 때 주사용자에게 간섭을 주지 않는 최대 허용 송신전력은 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$P^*(f_c, B) = \begin{cases} \rho & n = 0 \\ \min(P, \rho) & n \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $n = 0$ 는 주사용자가 없는 경우를 가리키며, $\min(x, y)$ 는 x 와 y 의 최소값을 나타낸다. Clancy는 정상 채널 (stationary channel)을 가정 하에 CR 용량 (여기서는 achievable capacity를 의미)을 계산하는 IT기반의 간섭 모델을 제시하고, 부사용자의 주파수 사전 정보 유무에 따라 이상적 간섭모델과 일반적 간섭모델로 구분 CR 용량을 분석하였다^[7].

본 논문에서는 기존의 정상채널하의 IT 기반 Clancy 간섭모델을 시간 축 상에 주사용자 채널 변화 (ON/OFF)가 발생하는 시변채널하의 간섭모델로 확장한다. 다시 말해 주파수 축은 물론 시간 축 상에 실제 발생하는 스펙트럼 홀 (spectrum hole, 유휴 채널)을 고려한 간섭모델을 제시하고 이에 기반한 CR 용량 분석을 통해 채널의 가용성 (availability) 유무를 판정한다. CR 용량은 시간 축 상에 발생하는 OFF 채널인 각 유휴슬롯에서 계산되는 순시용량과 이를 평균하여 얻은 평균용량으로 구분할 수 있다. 여기서는 유휴슬롯의 주기는 랜덤하며 한 슬롯 내에서는 일정한 (stationary) 간섭 특성을 가정한다. 우선 부사용자가 채널 내 모든 주파수 정보의 사전지식을 갖는 이상적인 간섭모델을 가정한다. 이때 하나의 특정 채널 (중심주파수 f_c , 사용대역 B)에 대한 부사용자 순시용량 (instantaneous capacity)은 Shannon Hartley 이론^[7]을 적용 다음과 같이 정의된다.

$$C_{id,x}(f_c, B) = \begin{cases} B \log_2 \left(1 + \frac{LP_x^*(f_c, B)}{P_I(f_c, B) + P_{L,x}(f_c, B)} \right) & x : \text{작수 (OFF)} \\ 0 & x : \text{홀수 (ON)} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $x (=1, 2, 3 \dots)$; 홀수는 주사용자 ON, 짝수는 주사용자 OFF를 가리키며 주기는 T_x 로 표기)는 해당 주파수 채널에 시간 축 상의 주사용자 ON/OFF (혹은 변경) 시점을 나타내는 시간 인덱스로 부사용자는 스펙트럼

센싱을 통하여 이 시점을 알 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 간소화를 위해 이상적인 스펙트럼 센싱을 가정한다. (4)에서 L 은 M 과 유사한 감쇄 파라미터로 0과 1사이 값을 갖으며 CR 송신기와 CR 수신기 간의 경로 손실을 나타낸다. $P_x^*(f_c, B)$ 는 시점 x 에서 중심주파수 f_c , 사용대역 B 에서 허용 가능한 최대 CR 송신 전력을 나타내고 (식 (3) 참조), $P_I(f_c, B)$ 는 CR 수신기 시스템 잡음 및 (여타 다른 시스템으로부터) 상호 간섭에 의한 간섭전력으로 측정 간섭온도 $T_I(f_c, B)$ *로부터 다음과 같이 유도된다: $P_I(f_c, B) = \kappa B T_I(f_c, B)$ (식 (1) 참조). 식 (4)의 $P_{L,x}(f_c, B)$ 는 시점 x 에서 주사용자에 의한 평균 간섭 전력을 나타내며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{L,x}(f_c, B) \leq \frac{1}{B} \sum_{i=1}^{n_x(f_c, B)} M P_i B_i \quad (5)$$

식 (5)에서 $n_x(f_c, B)$ 는 시점 x 에서 사용 주파수 대역 $[f_c - B/2, f_c + B/2]$ 내에 주사용자의 개수를 나타낸다. B_i 는 설정대역 B 내에 i 번째 주사용자의 사용 대역, P_i 는 i 번째 주사용자의 가용한 최대 전송출력을 나타낸다. 주파수 공유절차 (III장 참조)에서는 식 (4)를 이용 중심주파수 f_c , 사용주파수 대역 B 인 특정 주파수 채널 내의 각 유휴슬롯에서 부사용자의 요구용량 충족 여부를 점검하고 적응적으로 채널 파라미터 값을 설정하여 준다.

만일 부사용자에게 주파수 정보에 대한 사전지식 (a priori knowledge)이 없는 경우에는 일반적 간섭온도 모델^[7]을 이용한다. 이 모델은 할당된 주파수 대역 B 내에서는 동일한 간섭조건을 가정하며 시점 x 에서 부사용자 순시용량은 다음 식과 같이 유도된다.

$$C_{gen,x}(f_c, B) = \begin{cases} B \log_2 \left(1 + \frac{L(T_V(f_c) - T_{I,x}(f_c, B))}{MT_{I,x}(f_c, B)} \right) & x : \text{작수 (OFF)} \\ 0 & x : \text{홀수 (ON)} \end{cases}$$

여기서

$$T_{I,x}(f_c, B) = \frac{1}{kB^2} \int_{f_c - B}^{f_c + B} \widehat{S}_x(f) df$$

이고, $\widehat{S}_x(f)$ 는 시점 x 에서 사용 주파수 대역 $[f_c - B/2,$

* 여기서는 정상랜덤변수 (stationary random variable)을 가정한다.

fc+B/2] 내에 RF 간섭전력 스펙트럼 밀도를 나타낸다.

주파수 축 상의 하나의 특정 라이선스 주파수 채널 (f_c, B)에서의 용량이란 평균용량을 가리킨다. 이 평균 용량은 해당 채널내에 얻어진 모든 순시용량을 평균하여 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{C}(f_c, B) = E[C_x] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_x C_x T_x \quad (7)$$

식 (7)에서 C_x 는 이상적 간섭모델의 경우 $C_{id,x}$, 일반적인 간섭모델의 경우 $C_{gen,x}$ 를 가리킨다. 예를 들면 전 시간구간에 걸쳐 일정한 CR 용량 ($C_x = C$)을 가정하고, 주사용자의 ON주기 (T_{ON}), OFF 주기 (T_{OFF})가 평균값 μ_{ON}^i, μ_{OFF}^i 을 각각 갖는 지수분포를 가정할 때 이상적인 간섭모델하의 평균용량은 다음 식과 같이 된다.

$$\bar{C}(f_c, B) = \frac{C \mu_{ON}^i}{\mu_{OFF}^i + \mu_{ON}^i} \quad (8)$$

III. 간섭온도 기반 주파수 공유 기법

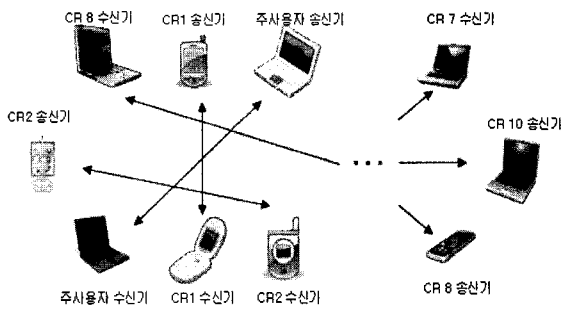
1. 기존의 방식

Clancy^[7]는 기존 주사용자 (primary user)의 유휴 라이선스 채널에 대한 CR 사용자 (부사용자)의 공유를 위한 간섭온도 (IT) 기반의 간섭 모델을 제시하고 CR 용량을 분석한다. Clancy 모델^[7]은 주파수 축 상의 유휴 채널은 고려하지 않고 시간 축 상의 유휴 채널은 고려하지

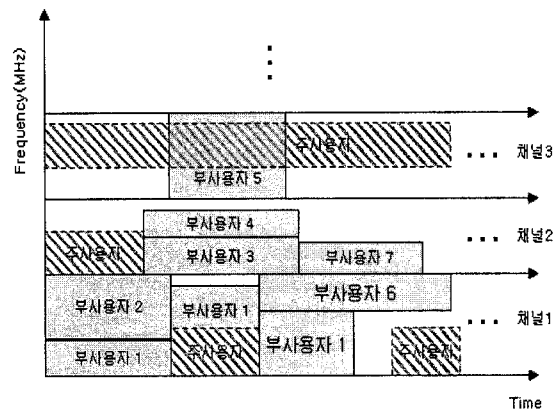
않고 있어 이를 이용한 공유 방식은 스펙트럼 이용률 개선이 제한된다. 문헌 [8]에서는 Clancy 간섭 모델에 기반을 둔 주파수 공유 절차 (순서도)를 제시하고 시물레이션을 통해 부사용자의 성능을 분석한다. 이 주파수 공유 방안은 단일 부사용자만을 고려하고 있어 실제 다수의 부사용자가 운용되는 CR 네트워크에 응용이 어렵다. 그 외에 기존 공유 기법^[8]은 공유절차 상에 주사용자로부터 스펙트럼 센싱 정보 전송을 별도로 요구하고 있어 실용성이 저하됨은 물론 각종 채널 간섭 특성에 따른 적정 파라미터 (대역폭, 중심 주파수, 출력 등) 값의 선정 등 적응성 고려도 미흡하다.

2. 제안된 방식

본 논문에서는 주사용자의 유휴 채널이 주파수 축은 물론 시간 축 상에 발생을 고려한 주파수 공유 기법을 제안한다. 본 논문에서는 단일 부사용자를 위한 기존 주파수 공유 기법^[8]을 다수의 부사용자간의 주파수 공유 기법으로 확장한다 (그림 1(a) 참조). 그림 1(b)는 주파수 축 및 시간 축 상에 주사용자와 부사용자간 주파수 채널 공유의 예시를 보여주고 있다. 부사용자는 스펙트럼 센싱을 통해 전 라이선스 스캔 대역 B_i 내에 주사용자 혹은 다른 부사용자가 현재 사용하지 않고 있는 가용한 유휴채널을 발견 시 이를 할당 사용한다. 만일 가용한 채널이 없는 경우엔 일정한 주기로 센싱하면서 유휴채널이 발생될 때까지 대기한다 (그림 2의 대기모드). 일반적으로 시간 축 상에 발생하는 유휴채널의 가용성 여부 판정은 측정된 순시용량에 기초하며 부사용



(a) 다중 부사용자 가입자 운용



(b) 주파수 축 및 시간 축 상의 CR 채널 할당

그림 1. 다중 CR 가입자에 대한 채널 할당
Fig. 1. Channel allocation for multiple CR users.

자의 요구용량 (최대요구전송속도)을 충족 시 해당 채널의 공유가 허용된다. 하나의 주파수 채널에 대한 평균용량은 순시용량을 평균하여 얻어진다. 앞으로 본 논문에서 특별한 언급 없이 사용하는 용량이란 순시용량을 가리킨다. 만일 주파수 공유 절차상에 요구용량기준을 만족하기 위해서는 현재 사용중인 주사용자의 주파수 대역이 중첩 (overlay)된 유희채널을 할당 사용 또한 가능하다 (예를 들면 그림 1 (b)의 부사용자 5). 단, 이 경우 부사용자 송출출력의 제한으로 주파수 간섭으로부터 주사용자 보호를 위한 간섭온도 제한 조건 ($T_T(f) \leq T_U(f)$)이 만족되어야 한다.

제안된 주파수 공유 방식은 기존의 주파수 공유 방식^[8]과는 달리 실제 기존 라이선스 네트워크에 적용을 고려하여 주사용자로부터 별도의 스펙트럼 센싱 정보를 요구하지 않는다. 대신 부사용자는 주사용자 신호에 대한 스펙트럼 센싱 (spectrum sensing)을 수행하며 주사용자의 채널 정보 (요구성능 (용량), 중심주파수, 사용 주파수 대역)는 서버 (access point, AP)로부터 사전 (a priori)에 부사용자에게 주어짐을 가정한다^[4]. 단, 여기서는 시뮬레이션 간소화를 위해 CR의 이상적인 스펙트럼 센싱을 가정한다.

제안된 주파수 공유 기법의 흐름도는 그림 2와 같다. 부사용자 채널은 총 센싱 (스캔) 대역 B_t 가운데 임의의 위치 (중심주파수 f_c 및 사용채널대역 B)에 할당 가능함을 가정한다.

단계 1) 새로이 데이터 전송을 위해 채널 공유가 필요한 신규 부사용자 (new CR, NCR)은 데이터 전송에 앞서 전 라이선스 대역 B_t 가운데 주사용자 (PU) 및 기존 부사용자 (existing CR, ECR)에게 간섭을 주지 않는 적절한 유희 채널을 발견해야 한다. 이를 위해 NCR은 우선 전 라이선스 스펙트럼에 대한 스캐닝으로 가용한 유희 채널 (즉, $T_T \leq T_U$ 인 PU 라이선스 채널)을 점검한다. 만일 가용한 채널이 없는 경우에는 가용한 채널이 나올 때까지 일정한 주기로 스캐닝 과정을 반복하면서 대기한다 (그림 2의 대기상태). 만일 가용한 채널이 있는 경우에는 채널 할당에 앞서 ECR이 라이선스 대역 내에 존재여부를 점검하고 ECR 존재 시에는 해당 채널의 간섭온도와 주파수 정보를 획득한다.

단계 2) NCR 송신기는 PU 및 ECR이 사용하지 않고 있는 유희채널 중 하나를 선정하고, 간섭 온도 모델링

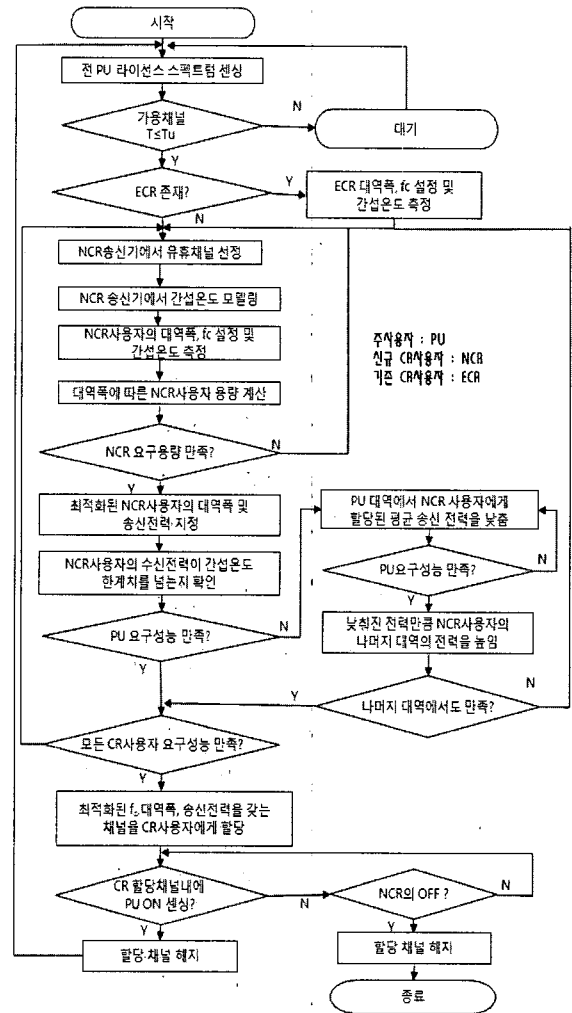


그림 2 제안된 주파수 공유 기법 흐름도
Fig. 2. Flow chart of proposed frequency sharing method.

을 통해 중심주파수와 대역폭의 설정 및 대역폭의 변화에 따른 NCR의 용량을 점검한다. 만일 CR 요구 용량을 충족하지 못한 경우에는 간섭모델링 및 유희채널의 재선정을 위해 단계 2)의 처음으로 다시 간다.

단계 3) NCR 수신기의 간섭온도 T_T 가 간섭온도 한계치 T_U 를 넘는지 확인하는 과정을 통해 PU 요구성능 만족 여부를 점검한다. 만일 PU 요구성능을 만족한 경우, 즉, 오버레이 간섭이 PU 성능에 영향을 주지 않는 경우에는 모든 CR 사용자 요구성능 점검단계로 간다. 그렇지 않은 경우 (즉 PU 성능 불만족 경우)에는 NCR에 할당된 채널에 송신전력을 조정하여 PU 요구성능이 만족되도록 한다. 만일 NCR 주파수 대역폭 조정 실패 시 단계 2)로 다시 돌아간다. CR 사용자 요구성능 점검단계에서 모든 CR 성능의 만족시 지정된 최적화

채널(중심 주파수 f_c , 사용대역 B , 송신전력)을 할당한 후 단계 4)로 가고 그렇지 않은 경우 단계 2)로 다시 돌아간다.

단계 4) 일정 주기로 할당 채널내에 PU 변화 (주사용자 ON)를 점검한다(폴링점검단계). 만일 변화가 없는 경우에는 현재 할당된 채널을 계속 사용하게 되지만 변화가 있는 경우에는 할당채널을 해지하고 단계 1)로 다시 간다. 폴링점검단계 중에 NCR의 데이터 전송이 완료된 경우에 할당 사용한 채널을 해지하고 종료한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

컴퓨터 시뮬레이션은 2.4GHz ISM 대역에서 실시한다. 부사용자는 총 라이선스 스캔 대역 $B_t = 100\text{MHz}$ 내에 임의 위치에서 발생가능하다고 가정한다. 부사용자가 주파수 채널 정보에 대한 사전 (a priori) 지식을 갖는 이상적인 간섭모델을 가정하여 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이션을 통해 주사용자와 CR간 간섭온도 기반의 주파수 공유 기법을 점검한다. 이를 위해 본 논문에서는 주파수 대역 내에 서로 다른 조건의 3가지 주사용자 발생 시나리오를 설정하고 제안한 공유 기법을 점검한다. 시뮬레이션을 통해 지수분포에 따른 시간 축 상의 주사용자 ON/OFF 발생을 가정한다. 주파수 공유절차 (그림 2 참조)에서는 시간 축 상의 주사용자 ON/OFF에 따른 간섭환경 변화로 해당 시점 x 에서 부사용자에게 새로운 채널 할당 (혹은 기존 채널 변경) 필요 시 할당 (혹은 변경)하여 주며 이를 위한 적절한 채널 파라미터 값도 설정하여 준다. 여기서는 주사용자와 부사용자의 송수신기간의 최소요구이격거리에 따른 감쇄 파라미터 M 의 값은 -65dB 로 가정한다. 시뮬레이션의 간소화를 위해 한 명의 주사용자 ($n = 1$)를 가정한다. 부사용자는 주사용자의 주파수 파라미터를 사전에 (AP를 통하여) 알고 있으며 부사용자들 간에는 주파수 (센싱) 정보의 교환이 가능함을 가정한다. 결과로 공유 절차상에 부사용자는 주사용자로부터 별도의 스펙트럼 센싱 정보를 요구하지 않는다. 시뮬레이션에서 주사용자의 수신 전력은 -86dBm , 간섭온도 제한치는 10000°K , 열잡음은 300°K 로 설정한다.

1. 시나리오 1

시나리오 1은 가장 기본적인 모델로 전 사용주파수

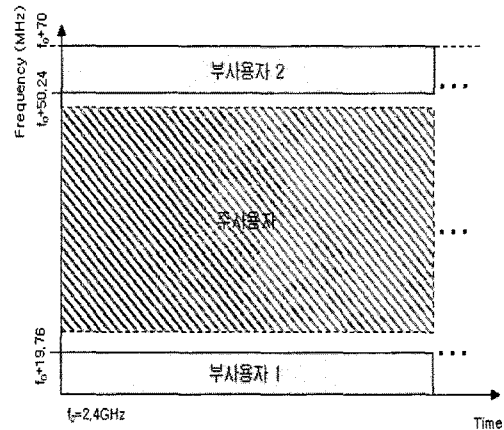


그림 3. 시나리오 1 주사용자와 부사용자의 주파수 할당

Fig. 3. Scenario 1 frequency allocation of PU and SUs.

표 1. 시나리오 1 시뮬레이션 초기 파라미터
Table 1. Initialized parameters for scenario 1.

	주사용자	부사용자
중심주파수	2435MHz	variable
대역폭	22MHz	variable
송신전력	8dBm	variable
요구 SNR	7.5dB	6.25dB

대역 ($B_t = 100\text{MHz}$) 가운데 고정 중심 주파수 $f_c = 2.435\text{GHz}$, 고정 주파수 대역 $B = 22\text{MHz}$ 를 사용하는 한 명의 주사용자를 가정한다. 이때 CR은 B_t 내의 주사용자에게 간섭을 주지 않는 (사용하지 않고 있는) 유휴 스펙트럼을 발견 (센싱)하고 2 명의 부사용자에게 성능을 만족하는 적절한 대역을 각기 할당하는 주파수 공유 방안을 시뮬레이션 한다 (그림 3 참조). 부사용자의 요구 용량은 100Mbps 이며 주사용자와 부사용자의 요구 신호대잡음비 (SNR)은 7.5dB 와 6.25dB 를 각각 가정한다. 주사용자의 주파수 정보는 사전 (a priori)에 알고 있다고 가정한다. 주사용자와 부사용자의 시뮬레이션 초기 파라미터는 표 1과 같다.

시나리오 1의 경우 주사용자는 일정한 대역폭을 사용하고, 부사용자들은 주사용자의 주파수 정보를 사전에 알고 있다고 가정한다. 그림 3은 시뮬레이션을 통한 부사용자간의 대역폭 할당의 예시를 보여주며, 그림 4는 본 논문에서 제안한 시스템 모델 (II 장 참조)을 이용 부사용자의 사용대역폭의 증가에 따라 측정된 순시용량 값의 변화를 보여주고 있다. 시뮬레이션을 통해 얻은 각 부사용자의 주파수 공유 파라미터 (중심 주파수, 할당 대역폭, 송신전력) 값은 표 2와 같다.

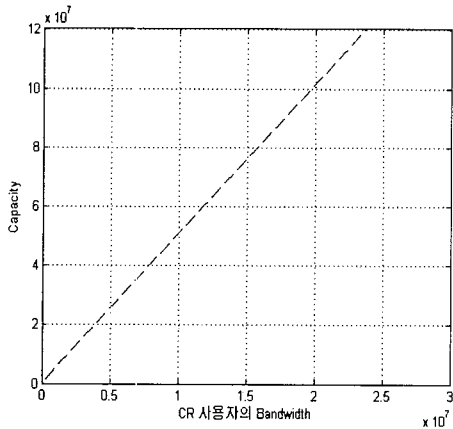


그림 4. 부사용자의 대역폭에 따른 부사용자의 용량 변화

Fig. 4. SU capacity vs. frequency bandwidth.

표 2. 시뮬레이션을 통한 부사용자의 파라미터 할당 값

Table 2. SU parameter values allocated via simulation.

	부사용자 1	부사용자 2
중심주파수 (MHz)	2409.88	2460.12
대역폭 (MHz)	19.76	19.76
송신전력 (dBm)	-70	-70

2. 시나리오 2

시나리오 2에서는 시나리오 1과 동일하게 주사용자가 일정한 중심 주파수 $f_c = 2435\text{MHz}$ 에서 고정 주파수 대역 $B=22\text{MHz}$ 을 사용한다. 단, 시나리오 1과 다른 점은 주사용자가 시간 축 상에 지수분포로 ON/OFF 되며 평균시간 주기 $E[T_{ON}] = E[T_{OFF}] = 20\text{ms}$ 를 가정한다. 부사용자는 주사용자에 대한 사전 (a priori) 주파수 정보 (f_c, B) 획득과 이상적인 스펙트럼 센싱을 가정한다. 부사용자의 요구용량은 100Mbps로 시나리오 1과 동일하다. 주사용자와 부사용자들의 시뮬레이션 초기 파라미터는 표 3과 같다.

시나리오 2에서는 주사용자의 주파수 축은 물론 시간 축 상의 ON/OFF에 따라 적절한 부사용자 주파수 할당을 요구한다 (그림 5 참조). 다시 말해 부사용자는 주사용자에게 간섭을 주지 않는 주파수 축 상의 유휴 스펙트럼을 할당 (그림 5의 부사용자 1, 부사용자 2 경우)받음은 물론 주사용자 OFF로 인한 시간 축 상의 유휴 스펙트럼에 대해서도 적절히 할당 (그림 5의 부사용

표 3. 시나리오 2의 시뮬레이션 초기 파라미터
Table 3. Initialized parameters for scenario 2.

	주사용자			부사용자
	T_1	T_2	T_3	
등장시간	T_1	T_2	T_3	variable
중심 주파수	2435MHz	·	2435MHz	variable
대역폭	22MHz	·	22MHz	variable
송신전력	8dBm	·	8dBm	variable
요구 SNR	7.5dB	·	7.5dB	6.24dB

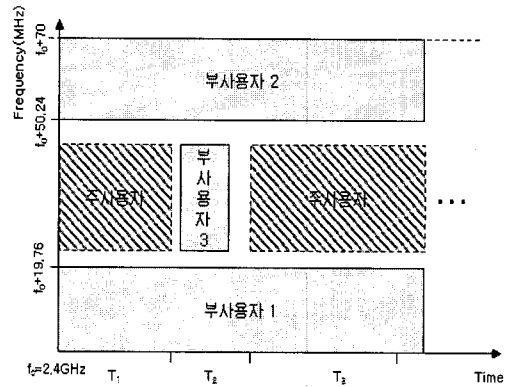


그림 5. 시나리오 2 주사용자와 부사용자의 주파수 할당

Fig. 5. Scenario 2 frequency allocation of PU and SUs.

표 4. 시뮬레이션을 통한 부사용자의 파라미터 할당 값

Table 4. SU parameter values allocated via simulation.

	부사용자1	부사용자 2	부사용자3
등장시간	T_1, T_2, T_3	T_1, T_2, T_3	T_2 only
중심주파수 (MHz)	2409.88	2460.12	2435
대역폭 (MHz)	19.76	19.76	19.76
송신전력 (dBm)	-70	-70	-70

자 3 경우) 받을 수 있다. 주파수 할당 시 부사용자들은 주사용자에게 간섭영향을 주지 않으며 동시에 제한한 간섭 모델 (II장 참조)에 의거 측정된 용량 값이 요구기준을 충족하는 적정의 중심주파수와 대역폭을 설정한다. 주사용자의 간섭이 없다는 가정하에 부사용자의 주파수 대역에 따른 요구용량 변화는 그림 4와 동일하다. 부사용자 3의 경우에는 여타 부사용자에게 간섭을 고려 중심주파수를 주사용자와 동일하게 선정되며 사용 대역폭은 요구용량 (100Mbps)을 만족하는 적정한 주파수 대역을 할당한다.

시나리오 2에서는 주사용자가 일정한 대역을 항상 사용하기 때문에 주사용자에게 영향을 미치지 않는 대역부터 부사용자에게 우선적으로 할당함으로써 간섭의 영향을 최소화 시킬 수 있다. 표 4에서는 시뮬레이션을 통해 얻은 부사용자 1, 2, 3의 주파수 공유 파라미터 값을 보여주고 있다.

3. 시나리오 3

시나리오 3에서는 주사용자의 (특정 주파수 채널을 기준으로 할 때) ON/OFF 평균 시간주기 $E[T_{ON}] = E[T_{OFF}] = 20ms$ 로 동일하며 2.4GHz~2.5GHz 대역 내에 임의 주파수에서 랜덤하게 발생하는 경우 (예를 들면 주파수 도약 방식)을 고려한다. 단, 주사용자의 사용주파수 대역은 $B=22MHz$ 를 가정한다. 시뮬레이션을 위한 예시 (그림 6 참조)로 처음 T_1 동안은 중심주파수가 2455MHz에서 다음 T_2 동안은 중심주파수가 2435MHz로 바뀌었다 다음 T_3 동안은 중심주파수가 다시 2455MHz로 바뀐다고 가정하자. 이때 부사용자의 요구 용량은 100Mbps이고 스펙트럼 센싱을 통해 사용주파수 대역 내 임의 채널에서 발생하는 주사용자의 채널 정보는 사전에 (a priori) 알 수 있다고 가정한다. 시나리오 3의 시뮬레이션을 위한 주사용자와 부사용자의 초기 파라미터 값은 표 5와 같다.

그림 6은 제한한 주파수 공유 절차에 따라 시뮬레이션을 수행 시 부사용자의 주파수 할당 예시를 보여준다. 시나리오 3의 주파수 할당은 주사용자 간섭이 없는 부사용자 1의 경우와 간섭을 갖는 부사용자 2의 경우를 나누어 생각할 수 있다. 우선 부사용자1의 경우 주사용자에게 간섭영향이 전혀 없으므로 요구 용량 수용이 가능한 유휴 스펙트럼 대역을 점진한 후 (대역에 따른 요구용량 변화는 그림 4 참조) 적절한 주파수 대역을 부사용자 1 채널로 할당하여 준다. 반면 부사용자 2의 경우는 주사용자 간섭으로 인해 시간대별로 나누어 살펴

표 5. 시나리오 3 시뮬레이션 초기 파라미터
Table 5. Initialized parameters for scenario 3.

	주사용자			부사용자
	T_1	T_2	T_3	variable
중심 주파수	2455MHz	2435MHz	2455MHz	variable
대역폭	22MHz	22MHz	22MHz	variable
송신전력	8dBm	8dBm	8dBm	variable
요구 SNR	7.5dB	7.5dB	7.5dB	6.24dB

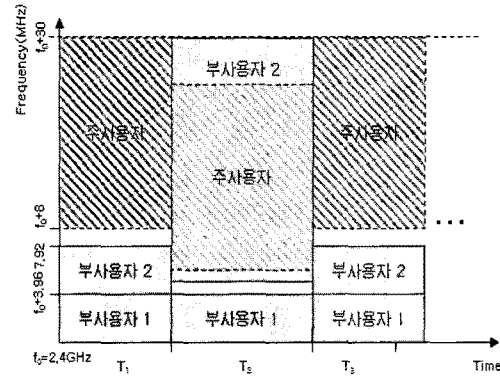


그림 6. 시나리오 3 주사용자와 부사용자의 주파수 할당
Fig. 6. Scenario 3 frequency allocation of PU and SUs.

볼 필요가 있다. 우선 T_1, T_3 구간에서는 주사용자의 중심주파수가 2455MHz 이어 주사용자에게 간섭 없이 부사용자 2의 요구 용량 (100Mbps) 충족시킬 수 있도록 적절한 채널 할당이 가능하다 (그림 6 참조). 그러나 T_2 구간에서는 주사용자의 주파수 변화로 상대적으로 적은 유휴 대역의 가능으로 부사용자에게 이 유휴 대역만을 할당 시 요구용량을 충족하기 어렵다 (최대 약 60Mbps ($B=12MHz$), 그림 7 참조). 그러므로 이때 공유 절차상으로 부사용자 2는 주사용자의 현재 사용대역을 오버레이 할당하여 사용한다. 이 경우 간섭으로 인한 주사용자 성능 저하 방지 기준 ($T_s(f_s) \leq T_u(f_u)$)을 충족시키기 위해 송신전력을 적절히 낮추며 이로 인한 용량 감쇄는 할당 대역폭의 확장 ($B = 43MHz$)으로 보상하여 준다.

그림 7은 주사용자의 $f_c = 2435MHz$ 인 경우 부사용자

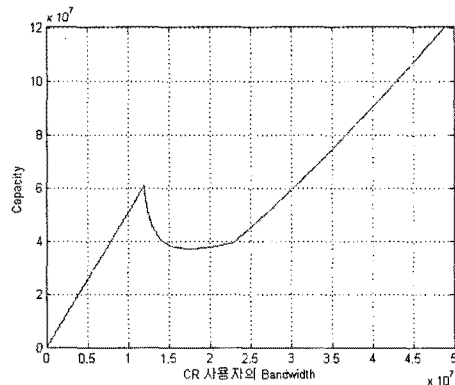


그림 7. 부사용자2의 T_2 구간에서 대역폭에 따른 용량 변화
Fig. 7. SU 2 capacity at T_2 vs. frequency bandwidth.

표 6. 시뮬레이션을 통한 부사용자의 파라미터 할당 값

Table 6. SU parameter values allocated via simulation.

등장시간	부사용자1	부사용자2		
		T_1	T_2	T_3
중심주파수 (MHz)	2409.88	2429.64	2441.26	2429.64
대역폭 (MHz)	19.76	19.76	43	19.76
송신전력 (dBm)	-70	-70	-11.22	-70

2의 T_2 구간에서 대역폭의 증가에 따른 용량 변화를 설명한다. 주사용자의 간섭을 받기 전 ($B \leq 12\text{MHz}$)에는 대역폭 증가에 따라 CR 용량이 60Mbps까지 선형적으로 증가하다가 주사용자의 간섭을 받는 오버레이 구간 ($12\text{MHz} < B \leq 22\text{MHz}$)에 접어들었을 때 갑자기 떨어져 유지되다가 다시 주사용자의 간섭을 받지 않는 구간 ($B \geq 22\text{MHz}$)에 접어들었을 때 비로소 용량이 (선형적으로) 증가함을 알 수 있다.

시나리오 3에서는 주사용자가 일정한 대역 내에 항상 등장하는 것이 아니라 랜덤하게 (임의로) 등장함을 가정한다. 따라서 부사용자는 주사용자의 도약주기 (T_x) 보다 매우 빠른 주기의 이상적 스펙트럼 센싱을 가정하며 매 주기마다 주사용자의 채널에 변화가 있을 시 새로운 주파수 채널을 부사용자에게 할당하여 주게 된다. 표 6에서는 시나리오 3의 시뮬레이션을 통해 얻은 각 부사용자의 주파수 공유 파라미터 값을 보여주고 있다. 이 시나리오에서 평균용량은 지수분포의 동일 시변 채널 조건하에 일정한 주파수 대역 $B=19.76\text{MHz}$ 의 사용을 가정 시 (식 (7) 참조) $\bar{C}=50\text{Mbps}$ 가 됨을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 다수의 CR 사용자 (부사용자)가 존재할 때 간섭온도 기반의 주파수 공유 기법을 모색하였다. 기존의 Clancy 간섭모델을 주사용자의 ON/OFF가 시간 축 상에 확률과정으로 발생하는 간섭모델로 확장하였다. 부사용자 채널 간섭 특성에 따라 중심주파수, 대역폭, 송신 전력을 적응적으로 할당하는 주파수 공유 절차를 제시하였다. 또한 기존의 방식과는 달리 제안한 방식에서는 실제 CR 운용 특성을 고려 주사용자로부터

별도의 스펙트럼 센싱 정보를 요구하지 않는다. 제안한 공유 절차를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 향후 OFDM 기반의 대역폭 할당 방안을 제시하고 페이딩 및 재밍 환경 등 악조건 채널하에 주파수 공유 방법을 모색할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Rep. ET Docket, "Cognitive radio technologies proceeding," Federal Communications Commission, no. 03-108, 2003.
- [2] A. Petrin and P. G. Steffes, Proc. of the ISART, "Analysis and comparison of spectrum measurements performed in urban and rural areas to determine the total amount of spectrum usage," March 2005.
- [3] J. Mitola et. al, "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Personal Commun., vol. 6, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [4] S. Haykin, "Cognitive Radios: Brain-Empowered Wireless Communications," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 23, no. 20, pp. 201-220, Feb. 2005
- [5] S. A. Jafar et. al, "Capacity Limits of Cognitive Radio with Distributed and Dynamic Spectral Activity," IEEE J. Select. Areas in Commun., vol. 25, no. 3, pp. 529-537, April 2007.
- [6] 김재명, "Cognitive Radio 기술의 구조 및 응용", 한국통신학회, 한국통신학회지 제24권 제9호, pp. 31 ~ 41, 2007년 9월.
- [7] T. Clancy, "Formalizing the interference temperature model", Wireless Communication & Mobile Computing, vol. 7, no. 9, pp. 1077-1086, Nov. 2007.
- [8] 박재석, "주사용자를 위한 간섭온도 다중접속 기술", 한국통신학회논문지 제32권 제11호, pp. 1119 ~ 1126, 2007년 11월.
- [9] R. Menon, R. M. Buehrer, and J. R. Reed, "Outage probability based comparison of underlay and overlay spectrum sharing techniques," Proc. of the IEEE DySPAN, pp. 101-109, Nov. 2005.

저 자 소 개

김 승 왕(정회원)

2010년 가톨릭대학교

정보통신공학과 학사 졸업(예정).

<주관심분야 : 인지무선통신, 신호처리>

김 혜 령(정회원)

2010년 가톨릭대학교

정보통신공학과 학사 졸업(예정).

<주관심분야 : 인지무선통신, 신호처리>



최 상 호(정회원)

2003년 2월~현재 가톨릭대학교

정보통신전자공학부 교수.

<주관심분야 : 인지무선통신, 애드혹 네트워크, 무선통신 자원관리, MIMO-OFDM, USN>