

OFDMA 기반 CR 네트워크에서 효율적인 부반송파 할당을 통한 시스템 용량 극대화 방안

정회원 박재현*, 유정민*, 종신회원 김덕경*

Throughput Maximization by Efficient Subcarrier Allocation in an OFDMA-based CR Network

Jae Hyun Park*, Jung Min Yoo* *Regular Members*, Duk Kyung Kim* *Lifelong Member*

요약

최근 주파수 자원의 효율적 사용에 대한 관심이 높아짐에 따라 Cognitive Radio가 활발히 연구되고 있다. 기존에는 Cognitive Radio의 이기적 공생방식과 비이기적 공생방식을 이용하여 시스템 용량을 향상하는 방안이 제안되었다. 이에 본 연구에서는 OFDMA 기반의 CR 네트워크에서 효율적인 부반송파 할당을 통한 시스템 용량 극대화를 제안한다. 또한 하나의 Primary 사용자가 존재하는 네트워크를 다수의 Primary 사용자가 존재하는 네트워크로 확장하여 극대화 방안을 적용하는 방안과 그 영향을 분석한다.

Key Words : Symbiotic Cognitive Radio, CR Relaying, OFDMA

ABSTRACT

Recently, cognitive radio attracts lots of interest to effectively utilize the limited spectral resource. In the previous researches, we proposed a method to enhance the system capacity of the overall network by using Selfish Symbiotic architecture and Non-selfish Symbiotic architecture. In this research, we further enhance the previous works to OFDM-based CR networks by using efficient subchannel allocation. The system performance is evaluated through intensive simulations with multiple primary users as well as a single primary user with different numbers of CR users.

I. 서론

최근 이동통신 및 방송기술의 발전으로 주파수 자원의 효율적 사용에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 특히 향후 유비쿼터스 센서 네트워크, 이동 및 고정 무선통신, 무선방송 등 다양한 무선 응용 기술들이 혼재된 상황은 주파수 자원의 효율적 이용에 대한 요구를 강화할 것으로 예상된다. 이에 다양한 무선자원 상황을 능동적으로 인지하여 동적으로 변화하는 사용자의 요구 및 상황에 적합하도록

유휴 무선자원을 지능적으로 활용하는 기술인 Cognitive Radio(CR)의 중요성이 부각되고 있다.

CR의 기본 발상은 Primary(licensed) 네트워크와 CR(secondary 또는 unlicense) 네트워크가 같은 주파수 스펙트럼에서 공존하게 하는 것이다. Primary 사용자(PU:Primary User)들은 언제든지 스펙트럼에 접근할 수 있지만, CR 사용자(CRU: CR User)들은 Primary 네트워크의 사용하지 않는 부분을 이용한 데이터 전송기회를 얻기 위해서 무선 환경을 감지한다^[2]. 이때, CR 네트워크는 Primary 네트워크에

※ 이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-20333-0).

* 인하대학교 정보공학과 무선통신 연구실 (pakjjae@gmail.com)

논문번호 : KICS2010-07-294, 접수일자 : 2010년 7월 5일, 최종논문접수일자 : 2011년 1월 27일

간섭을 발생하지 않아야 한다. 그리고 Primary 네트워크 또한 secondary 네트워크의 존재를 인식할 필요없이, secondary 네트워크가 없는 경우와 동일하게 동작한다. 이와 같은 동작을 위해서 기존의 CR 방식들은 스펙트럼 감지(Spectrum Sensing) 방식을 사용한다³⁾.

스펙트럼 감지의 대표적 방식인 스펙트럼 홀 감지(Sensing of spectrum holes) 방식은 CRU들이 Primary 네트워크의 스펙트럼 자원중 사용하지 않는 부분인 스펙트럼 홀(Spectrum holes)들을 감지해서 사용하는데 이는 스펙트럼 자원할당의 관점에서 비효율적이다¹¹⁻¹²⁾. CR방식은 스펙트럼 이용효율과 PU와 CRU 모두의 전송품질을 보장해야 한다. 하지만 스펙트럼 홀 감지방식은 Primary와 CRU들 사이의 상호작용의 부족 및 장치와 네트워크의 불확실성에서 오는 불규칙한 채널 때문에 그 신뢰성이 항상 보장되지 않는다. 예를 들면, 숨어있는 노드에 의한 잘못된 스펙트럼 홀의 결정이 발생할 수도 있고, 이용된 CR링크의 전송과 Primary 링크 사이에 간섭이 발생할 수도 있다. 또한, 만약 CRU가 존재하고 있는 스펙트럼 홀을 감지하지 못하면, 채널 이용효율에 손해를 본다⁴⁾.

이에 본 연구에서는 스펙트럼 홀 감지방식이 아니라 BS(Base Station)나 CRS(CR Station)를 통한 스펙트럼 대여(Spectrum leasing)방식을 사용한다⁵⁾. 이 방식을 통해서 [4]에서는 PU가 자신의 링크 품질을 향상시키기 위해서 CRU에게 CR relaying 협력 통신을 요청할 수 있고, 이 협력통신을 통해서 Primary 링크의 전송률이 증가하여 필요전송시간이 줄어든다. 이때, 발생한 여분의 스펙트럼 자원을 스펙트럼 대여방식을 이용하여 CRU의 데이터를 전송하는데 사용하면 전체 네트워크의 시스템 용량이 협력통신을 하기 전보다 향상된다. 이와 같이 Primary 네트워크에는 CR relaying 협력통신을 통해 그 신뢰도를 높이면서 필요전송시간을 줄이고, CR 네트워크에는 여분의 스펙트럼을 제공하는 구조를 공생구조(symbiotic architecture)라고 한다⁴⁾.

그리고 이와 같은 공생구조에서 여분의 스펙트럼 자원을 협력통신을 한 CRU가 자신의 데이터를 전송하는 CR방식을 이기적 공생방식이라 하고, 이와 다르게 여분의 스펙트럼 자원을 CR 네트워크 내에서 가장 높은 전송용량을 가질 수 있는 CRU에게 할당하는 CR방식을 비이기적 공생방식이라 한다⁶⁾.

이기적, 비이기적 공생방식들은 여분의 스펙트럼 자원을 모두 CR 네트워크 내의 한 CRU에게 할당

한다⁴⁻⁶⁾. 이때, 만약 스펙트럼 자원이 할당된 CRU가 Frequency-selective fading을 겪는다면, 주파수에 따라 신호가 간섭을 일으켜서 전송용량이 감소된다. OFDM기반 시스템의 관점에서 보면, 한 사용자가 모든 유효 부반송파를 독점함으로써 효율적인 주파수 자원할당이 이루어지지 않았기 때문이다. 이에 본 논문은 주어진 여분의 스펙트럼 자원을 부반송파 단위로 CRU들에게 할당함으로써 전체 시스템 용량을 극대화하는 방안을 제시한다⁷⁾. 이는 한 사용자가 모든 유효 부반송파를 독점하는 것이 아니라, 여러 사용자가 유효한 부반송파의 집합을 서로 다르게 분할 할당 받아 사용하는 다중 사용자 접속 방식을 사용한다. 이러한 유연한 자원할당을 통해서 주파수 효율과 전체 시스템 용량을 증가시킬 수 있다. 또한, 기존의 하나의 Primary 사용자가 존재하는 네트워크를 다수의 Primary 사용자들이 존재하는 네트워크로 확장하여 극대화 방안을 적용하는 방안과 그 영향을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장의 2.1절에서는 기존의 이기적과 비이기적 공생방식의 동작을 설명하고, 2.2절에서는 OFDM기반의 시스템에서 부반송파의 할당을 적용했을 때의 동작과 성능에 대해 기술한다. III장은 제안된 다수의 PU들이 존재하는 시스템에서 전체 시스템 용량의 극대화 방안과 그 성능 분석에 대해 기술한다. 그리고 IV장은 결론 부분이다.

II. Cognitive Radio

2.1 기존의 이기적과 비이기적 공생방식

그림 1은 [6]에서 제안하는 CR Relaying을 이용한 공생구조를 보여준다. 먼저, BS와 CRS는 전체 CSI(Channel State Information)는 가지고 있다고 가정한다. PU는 자신의 링크 품질을 향상시키기 위해서 CR 네트워크에 있는 사용자 중에서 채널 상태가 좋은 CR2와 CR3에게 AF(Amplify and Forward) 릴레이 협력전송을 요청한다. 이 CR 릴레이 협력전송을 통해서 PU가 더 높은 전송률을 얻을 수 있고, 이는 PU의 데이터를 전송하는데 필요한 전송시간을 줄인다. 이때 Primary 네트워크에는 여분의 스펙트럼 자원이 발생하고, 이 발생한 자원은 CRU의 데이터를 전송하기 위해 할당된다. 이때 여분의 스펙트럼 자원을 CR2,3에 할당하면 이기적 공생방식이고, CR 네트워크 내에서 채널상태가 가장 좋은

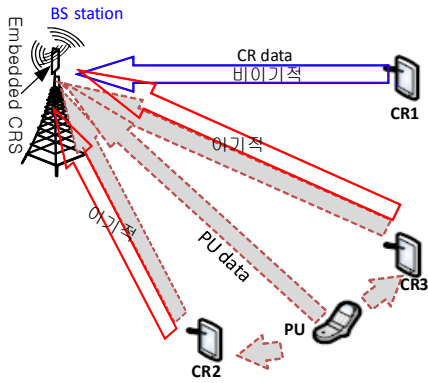


그림 1. CR 릴레이의 한 예

CR1에게 할당하면 비이기적 공생방식이다^{[4],[6]}.

2.2 OFDM 기반 시스템에서의 CR 방식

그림 2는 그림 1의 예를 기본으로 CR 방식에 따른 SNR의 변화량과 OFDM시스템에서의 CR 방식의 예를 보여준다. 이를 통해서 [6]의 기존 CR 방식과 본 논문에서 제시하는 OFDM 시스템에서의 CR 방식에서의 스펙트럼 자원할당 방식을 비교할 수 있다.

그림 2-(a)는 CR 릴레이 협력전송이 없이 PU에서 BS로 데이터 전송할 때의 SNR값을 보여준다. 이때, PU가 필요한 전송시간은 1로 가정한다. 그림

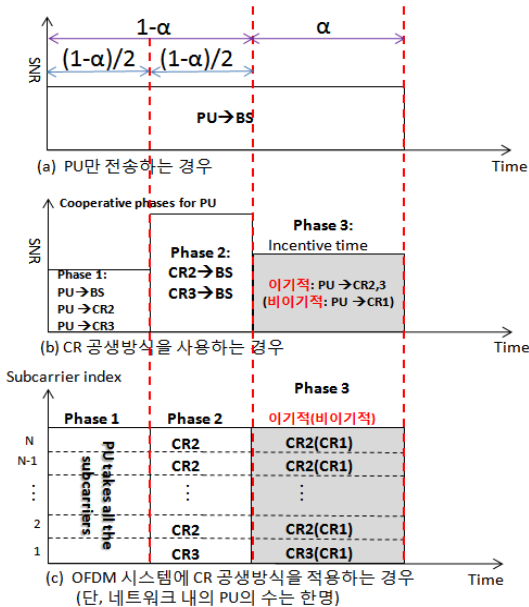


그림 2. 기존의 CR 방식과 OFDM에서의 CR 방식

2-(b)의 Phase 1에서는 PU가 $(1-\alpha)/2$ 의 시간동안에 BS와 CR2, CR3로 데이터를 전송하고, Phase 2에서는 CR2와 CR3가 $(1-\alpha)/2$ 의 시간동안에 PU로 받은 신호를 증폭하여 BS로 전송한다. 이 Phase 2에서의 협력전송으로 PU의 데이터전송의 SNR이 높아지고, 필요전송시간이 α 만큼 줄어든다. Phase 3에서는 이 여분의 시간 α 를 CRU의 데이터를 전송하는데 사용한다. 이때, Phase 2에서 협력전송을 한 CR2,3에게 여분의 시간을 할당하는 방식을 이기적 방식이라 하고, CR 네트워크 내에서 가장 좋은 채널상황을 갖는 CR1에게 할당하는 방식을 비이기적 방식이라 한다. 그림 2-(c)에서는 OFDM 시스템에 CR방식을 적용하였을 때, CR 방식에 따른 부반송과의 할당의 예를 보여준다. 이때, 그림에서의 y축은 부반송과의 인덱스를 나타내고, PU에는 N개의 부반송과들이 할당되어 있다. Phase 1에서는 PU가 모든 부반송과들을 사용하고, 이는 그림 2-(b)의 Phase 1과 같은 동작을 한다. 그리고 Phase 2에서는 그림 2-(b)와는 다르게 각각의 부반송과마다 채널상태가 좋은 CR을 할당하여 PU 데이터를 증폭하여 전송한다. 그리고 Phase 3에서는 각 부반송과를 Phase 2에서 할당한 CR과 동일한 CR에게 할당하는 방식을 이기적 방식이라 하고, 이기적 방식과 다르게 각 부반송과를 CR 네트워크 내에서 가장 좋은 채널상황을 갖는 CR에게 할당하는 방식을 비이기적 방식이라 한다.

그림 3은 부반송과 단위로 전송되는 Primary와 CR 네트워크의 시스템 모델을 나타낸 그림이다. 전체 시스템은 각각 하나의 PU, BS, CRS, 그리고 K개의 CRU를 갖는다. 그리고 a,b,c는 각각 PU에서 CRU로의 채널, CRU에서 BS로의 채널, 그리고 CRU에서 CRS로의 채널의 채널응답을 나타낸다. 이와 같은 모델을 기반으로 Primary 네트워크에서 수신하는 신호를 나타낼 수 있다. 이때의 네트워크

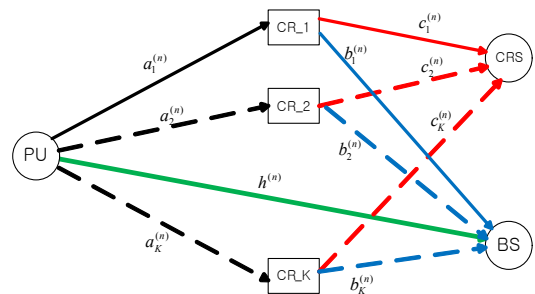


그림 3. Primary와 CR 네트워크가 공존하는 시스템 모델

는 Half Duplex 방식을 사용함으로 2개의 Time Slot(TS)으로 구분한다. 먼저 첫 번째 TS(phase 1)에서는 PU가 n 번째 부반송파를 사용하여 신호 $x^{(n)}$ 을 채널 $h^{(n)}$ 과 $a_k^{(n)}$ 을 통해서 BS와 k 번째 CRU로 전송한다. BS에서 수신한 신호는 식 (1)의 수신신호 $y_I^{(n)}$ 이 된다.

$$y_I^{(n)} = h^{(n)}x^{(n)} + v_1^{(n)} \quad (1)$$

이때 PU에서 전송한 신호를 k 번째 CRU에서 수신하면 $y_k^{(n)}$ 으로 식 (2)과 같다. 이때 $v_1^{(n)}$ 과 $v_k^{(n)}$ 는 BS와 k번째 CRU에서의 잡음을 나타낸다.

$$y_k^{(n)} = a_k^{(n)}x^{(n)} + v_k^{(n)} \quad k = 1, \dots, K \quad (2)$$

이 k 번째 CRU가 수신한 $y_k^{(n)}$ 을 $\mu_k^{(n)}$ 만큼 AF(Amplify and Forward)하면 신호 $\hat{x}_k^{(n)}$ 이 된다. 이때의 PU와 CRU는 전송전력(Tx Power) P_T 를 갖는다. 본 논문에서는 최적전력할당을 적용하지 않기 때문에 P_T 를 전체 부반송파의 수 N으로 나누면 각 부반송파에 할당된 전송전력 S가 된다. 이를 통해서 증폭인자 $\mu_k^{(n)}$ 는 $\sqrt{S/|a_k^{(n)}x^{(n)} + v_k^{(n)}|^2}$ 의 값을 갖는다. 그리고 k 번째 CRU는 신호 $\hat{x}_k^{(n)}$ 을 채널 $b_k^{(n)}$ 을 통해서 BS로 전송하는데, BS에서는 모든 K개의 CRU로부터 전송되는 신호를 수신하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{II}^{(n)} = \sum_{k=1}^K (\rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \hat{x}_k^{(n)}) + v_2^{(n)} \quad (3)$$

s.t. $\rho_k^{(n)} \in \{0, 1\}, \forall k, n$
 $\hat{x}_k^{(n)} = \mu_k^{(n)} y_k^{(n)} = \mu_k^{(n)} (a_k^{(n)} x^{(n)} + v_k^{(n)})$

이때 $\rho_k^{(n)}$ 으로 K개의 CRU로부터의 각 신호에 부반송파의 할당여부를 나타낸다. 만약 k 번째 CRU에 n 번째 부반송파가 할당되었다면 1, 할당되지 않았다면 0으로 표현한다. 그리고 BS에서의 잡음 $v_2^{(n)}$ 의 합을 더하여 두 번째 TS(phase 2)에서 BS가 수신한 신호를 나타낼 수 있다. 그리고 식 (1)과 식 (3)를 기반으로 CR 릴레이 협력신호가 있을 때의 Primary 네트워크 전송용량을 계산한다. 또한, $\rho_k^{(n)}$ 를 이용해서 PU에게 할당된 N개의 부반송파를 CRU에게 최적할당 하였을 때의 각 부반송파의 전

송용량의 합으로 나타낼 수 있다.

그리고 식 (1)과 식 (3)을 통해서 BS에서 2개의 TS동안에 수신한 신호 $y^{(n)}$ 을 나타낼 수 있다.

$$y^{(n)} = W_I^{(n)} y_I^{(n)} + W_{II}^{(n)} y_{II}^{(n)} \quad (4)$$

MRC(Maximum Ratio Combining)을 하기위해서 각각의 TS에서 수신한 신호에 가중치를 곱한다. 이때의 가중치 $W_I^{(n)}$ 와 $W_{II}^{(n)}$ 는 BS에서 첫 번째 TS에서 수신한 신호 $y_I^{(n)}$ 와 두 번째 TS에서 수신한 신호 $y_{II}^{(n)}$ 를 MRC하기 위한 가중치 값이다.

이때 전송용량은 BS가 첫 번째와 두 번째 TS에서 수신한 신호를 MRC를 통해서 두 신호의 SNR의 합으로 나타낼 수 있다^{[4],[8]}. 식 (5)는 CR 릴레이 협력신호가 있을 때의 Primary 네트워크의 전송용량을 나타낸다^[9].

$$C_P = \max_{\rho_k^{(n)}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \log_2(1 + SNR_{S \rightarrow D}^{(n)} + SNR_{S \rightarrow R \rightarrow D}^{(n)}) \quad (5)$$

모든 전송용량의 단위는 bps/Hz이다. 이때, $SNR_{S \rightarrow D}^{(n)}$ 은 BS에서 첫 번째 TS에서 수신한 신호의 신호대잡음비이다. 식(4)에서 우식의 첫 번째항의 신호제기는 식 (1)의 신호부분에 가중치 $W_I^{(n)}$ 를 곱한 값으로 $W_I^{(n)} h^{(n)} x^{(n)}$ 의 값을 갖는다. 그리고 잡음의 제기는 식 (1)의 잡음부분에 가중치 $W_I^{(n)}$ 를 곱한 값인 $W_I^{(n)} v_1^{(n)}$ 를 갖는다. 이때의 가중치는 BS가 채널값 $h^{(n)}$ 에 대한 정보를 정확히 알고 있다면, 가중치는 채널 $h^{(n)}$ 의 공액복소수로 정한다 [10]. 그리고 $SNR_{S \rightarrow D}^{(n)}$ 를 구하는 과정에서 분자분모의 곱해진 가중치 $W_I^{(n)}$ 가 나누어져 사라진다. 신호와 잡음부 각각의 평균전력을 구하여 신호대잡음비를 구하면 다음과 같다.

$$SNR_{S \rightarrow D}^{(n)} = \frac{E[|W_I^{(n)} h^{(n)} x^{(n)}|^2]}{E[|W_I^{(n)} v_1^{(n)}|^2]} \quad (6)$$

$$= \frac{S}{E[|v^{(n)}|^2]} E[|h^{(n)}|^2]$$

$$= \frac{S}{N_{pow}} E[|h^{(n)}|^2]$$

where $W_I^{(n)} = c(h^{(n)})^*$,
 $N_{pow} = E[|v^{(n)}|^2]$,
 c : arbitrary complex constant

마찬가지로, $SNR_{S \rightarrow R \rightarrow D}^{(n)}$ 는 두 번째 TS에서 BS가 수신한 신호의 신호대잡음비로 식 (4)의 우식 두 번째 항의 신호부분과 잡음부분의 평균전력의 비로 나타낼 수 있다. 또한 식 (6)과 마찬가지로 식 (3)의 수신신호가 겪은 채널들의 평균의 공액복소수를 가중치 $W_{II}^{(n)}$ 로 한다. 그리고 이 가중치는 식 (6)과 마찬가지로 분자분모에 공통적으로 있기 때문에 SNR을 구하는 과정에서 나누어져 제거된다.

$$SNR_{S \rightarrow R \rightarrow D}^{(n)} = \frac{E \left[\left| W_{II}^{(n)} \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} a_k^{(n)} x^{(n)} \right|^2 \right]}{E \left[\left| W_{II}^{(n)} \left(\sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} v_k^{(n)} + v_2^{(n)} \right) \right|^2 \right]} \quad (7)$$

$$= \frac{E \left[\left| \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} a_k^{(n)} x^{(n)} \right|^2 \right]}{E \left[\left| \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} v_k^{(n)} + v_2^{(n)} \right|^2 \right]}$$

where $W_{II}^{(n)} = c \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} a_k^{(n)} \right)^*$

이때 BS와 모든 CRU의 잡음분포가 동일하다면, 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SNR_{S \rightarrow R \rightarrow D}^{(n)} = \frac{S}{E[v^{(n)}]^2} \frac{E \left[\left| \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} a_k^{(n)} \right|^2 \right]}{E \left[\left| \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} + 1 \right|^2 \right]} \quad (8)$$

$$= \frac{S}{N_{pow}} \frac{E \left[\left| \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} a_k^{(n)} \right|^2 \right]}{E \left[\left| \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} b_k^{(n)} \mu_k^{(n)} + 1 \right|^2 \right]}$$

where $v^{(n)} = v_2^{(n)} = v_k^{(n)}$
 $N_{pow} = E[v^{(n)}]^2$

식 (5)와는 다르게 CR 릴레이 협력신호가 없을 때의 Primary 네트워크 전송용량은 PU에서의 신호가 BS로 직접 전송되었을 때의 신호의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{dir} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \log_2(1 + SNR_{S \rightarrow D}^{(n)}) \quad (9)$$

이 식 (9)를 식 (5)의 전송용량 C_p 와 비교하였을 때, C_p 가 C_{dir} 보다 큰 값을 가질 때 CR이 릴레이 협력신호를 보낸다. 이와 같이 C_p 가 C_{dir} 보다 큰

값을 가질 때만 협력전송하기 때문에 Primary에서 같은 양의 데이터를 전송한다고 가정하였을 때, CR 릴레이가 있는 경우에 필요전송시간이 줄어들어 여분의 스펙트럼 자원이 발생한다. 이러한 여분의 스펙트럼 자원은 Phase 3에서 CRU의 데이터를 전송하는데 사용할 수 있다.

이기적 공생방식에서는 각 부반송파를 CR 릴레이 협력통신에 이용한 CR들과 동일한 CR들에게 할당한다. 이는 k 번째 CRU에게 n번째 부반송파 할당여부를 결정하는 변수 $\phi_k^{(n)}$ 를 이용하는데, k 번째 CRU가 n 번째 부반송파를 이용하여 협력통신을 하였으면 1이 되고, 협력통신을 하지 않았다면 0이 된다. 이는 식 (3)의 변수 $\rho_k^{(n)}$ 와 같은 값을 갖는다.

* 이기적 공생방식의 CR 전송용량

$$C^{(1)} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \phi_k^{(n)} \log_2 \left(1 + \frac{E[c_k^{(n)} x^{(n)}]^2}{E[v^{(n)}]^2} \right) \quad (10)$$

s.t. $\phi_k^{(n)} \in \{0, 1\}, \forall k, n$
 $\sum_{k=1}^K \phi_k^{(n)} = 1, \forall n$

그리고 비이기적 공생방식에서는 식 (10)과는 다르게 CR 전송용량이 최대가 되도록 각 부반송파를 CRU에게 할당하고, 이를 통해서 CR 전송용량을 얻는다. 이때, 변수 $\tilde{\phi}_k^{(n)}$ 을 통해서 k 번째 CRU에게 n번째 부반송파 할당여부를 결정하는데, 하나의 부반송파를 CRU들 중에서 가장 좋은 채널상태를 갖는 한 CRU에게 할당한다. 이와 같은 할당을 통해서 CR 전송용량을 극대화하였고, 이를 통해서 전체 시스템 용량을 극대화할 수 있다.

* 비이기적 공생방식의 CR 전송용량

$$C^{(2)} = \max_{\tilde{\phi}_k^{(n)}} \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \tilde{\phi}_k^{(n)} \log_2 \left(1 + \frac{E[c_k^{(n)} x^{(n)}]^2}{E[v^{(n)}]^2} \right) \quad (11)$$

s.t. $\tilde{\phi}_k^{(n)} \in \{0, 1\}, \forall k, n$
 $\sum_{k=1}^K \tilde{\phi}_k^{(n)} = 1, \forall n$

식 (5)-(11)의 수식을 이용해서 전체 시스템의 시스템 용량을 계산할 수 있다. 먼저 전송용량 C_p 에 의해서 발생된 여분의 스펙트럼 자원의 비율 α 을 유도한다. CR 릴레이 협력전송이 없을 때의 필요한

송시간을 1이라 하였을 때, 비율 α 는 CR 릴레이 협력전송을 하였을 때 발생하는 여분의 전송시간이 된다. 그리고 그림 2에서 확인한 것과 같이 Phase 가 1과 2로 나누어져 전송되기 때문에 CR 릴레이가 있을 때의 전송시간은 $(1-\alpha)/2$ 이 된다. 이때, CR 릴레이가 있을 때와 없을 때 전송하는 데이터 전송량이 같다고 가정하면 식 (12)와 같이 비율 α 를 유도할 수 있다.

$$1 \cdot C_{dir} = \frac{(1-\alpha)}{2} \cdot C_P \tag{12}$$

$$\alpha = 1 - \frac{2C_{dir}}{C_P}$$

그리고 비율 α 와 전송용량 C_p 와 $C^{(1)}$ 을 이용해서 이기적 공생방식을 사용했을 때의 전체 시스템 용량 $C_{system}^{(1)}$ 을 구할 수 있다. 이때의 전체 시스템의 용량은 Primary 데이터 전송량과 이기적 공생방식의 CR 데이터 전송량의 합으로 나타낼 수 있다.

$$C_{system}^{(1)} = \frac{(1-\alpha)}{2} C_P + \alpha C^{(1)} \tag{13}$$

마찬가지로 비이기적 공생방식을 사용했을 때의 전체 시스템 용량은 다음의 식 (14)와 같이 Primary 데이터 전송량과 비이기적 공생방식의 CR 데이터 전송량의 합으로 나타낸다.

$$C_{system}^{(2)} = \frac{(1-\alpha)}{2} C_P + \alpha C^{(2)} \tag{14}$$

2.3 제안된 CR 방식의 모의실험

본 절에서는 제안된 CR 방식을 적용했을 때 시스템의 용량이 향상되는 정도를 알아보는 모의실험의 결과를 보여준다. 시뮬레이션 환경은 표 1의 환경을 따른다.

모의실험은 그림 3의 시스템 구조를 기본으로 하

표 1. 시뮬레이션 환경

Parameter	Value/Explanation
Cell Radius	2km
Pathloss Exponent	2
Tx Power(P_T)	60 dBm (10^6 mW)
Noise Power	-90 dBm (10^{-9} mW)
fading	frequency selective fading for subchannels

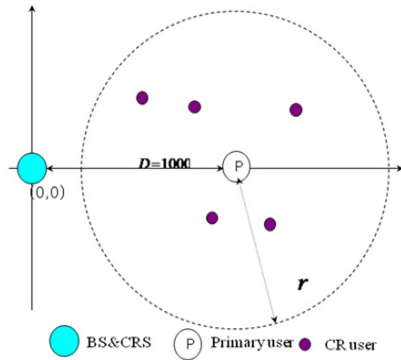


그림 4. 모의실험을 위한 시스템 환경

여 그림 4과 같이 BS와 CRS를 동일한 위치 (0,0)에 위치하고, PU를 (1000,0)에 위치하게 한다. 그리고 PU와 BS(CRS)사이에서 CRU들을 무작위로 위치하게 한다. 이때의 CRU들의 수는 1개부터 31개까지 늘려가면서 각각 이기적 공생과 비이기적 공생방식을 사용하였을 때의 전체 시스템 용량을 C_{dir} 로 정규화한 값을 비교한다. 이때, Primary 사용자에게 할당된 부반송파의 수 N의 값은 12으로 고정한다. 부반송파는 각각 선택적으로 하나의 페이딩값을 갖는 frequency selective fading을 겪는다. 또한 본 모의실험에서는 섀도잉(shadowing)은 고려하지 않는다. 그리고 BS, PU, CRU와 CRS는 모두 하나의 안테나를 가지고 있다고 가정한다.

기존의 이기적 공생방식보다 협력통신을 통해 얻어진 여분의 스펙트럼 자원을 부반송파들 단위로 가장 좋은 채널 상태를 갖는 CRU에게 할당하는 비이기적 공생방식의 경우가 더 높은 시스템 용량을 갖는다. 이때, 네트워크내의 CR의 수가 20일 때를 기준으로 비이기적 공생방식의 경우가 이기적 공생방식의 경우보다 약 20% 정도 전체 시스템 용량이 향상되었다. 그리고 네트워크 내의 CRU의 수가 늘어날수록 이 차이가 커지는 것을 확인하였다.

그림 6에서는 PU에 할당된 부반송파의 수에 따른 전체 시스템 용량의 변화를 확인하였다. 비이기적 방식은 본 논문에서 제안하는 부반송파 할당을 사용하여 전송 용량을 극대화 하였고, 이기적 방식은 부반송파의 할당을 기존 논문의 이기적 할당방식에 따라 협력전송을 한 CR 사용자에게 할당하였다. 본 결과는 완전탐색(exhaustive search)을 통해 얻는다. 먼저, 부반송파의 수가 늘어나면 시스템 용량 또한 증가하지만 부반송파의 수가 일정 수 이상 이 되면 그 증가량이 줄어든다. 하지만 네트워크 내

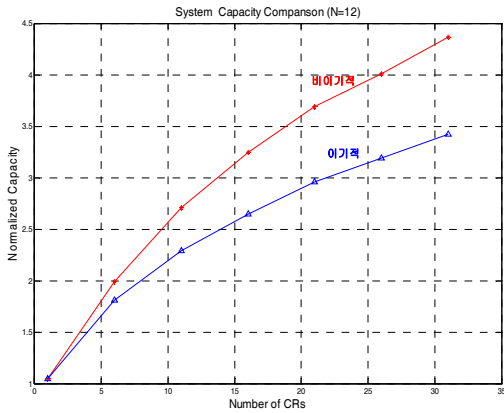


그림 5. CR 방식에 따른 Normalized Capacity 비교

의 CR의 수를 증가 시키면 부반송파의 수의 증가에 따른 시스템 용량의 증가량도 늘어나고, 부반송파가 일정 수이상되어 증가량이 감소하는 비율도 줄어들음을 확인하였다.

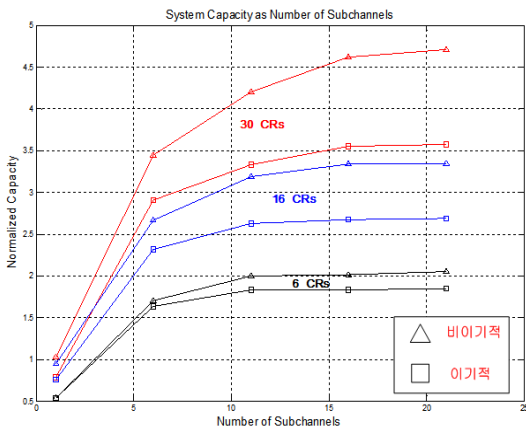


그림 6. PU에 할당된 부반송파의 수에 따른 영향

III. 확장된 시스템에서의 CR 방식

3.1 다수의 PU들이 존재하는 시스템에서의 CR 방식

본 절에서는 다수의 PU들이 존재하는 시스템에서 시스템 용량을 극대화하는 방안과 그 영향을 분석한다. 그림 4는 네트워크 내의 PU의 수를 하나로 고정해 놓고 CRU의 수를 늘려가는 시뮬레이션 환경이다. 하지만 다수의 PU와 CRU가 무작위로 분포한다고 가정하는 것이 보다 실제 네트워크에 가

깝다는 판단 하에, 식 (5)에서 제안하는 부반송파 할당방안을 적용하기 위한 새로운 시뮬레이션 환경과 가정들이 필요하다.

그림 7에서 CRS와 BS는 네트워크의 중심에 위치, PU는 Primary 네트워크의 셀 경계인 1km 지점에 일정한 간격으로 분산되어 위치, CRU는 CR 네트워크의 셀 경계인 1km안에 무작위로 위치한다고 가정하였다. 그리고 이때의 셀 경계는 각각의 기지국에서 수신한 신호의 세기가 1 mW(0 dBm)가 되는 지점을 말한다. 이와 같이 PU를 셀 경계에 일정한 간격으로 분산하는 이유는 PU의 위치가 BS에 인접하면 Direct 채널을 통한 채널 용량이 CR 협력 전송을 하는 경우보다 더 커서 CRU 협력전송이 필요하지 않게 되기 때문에 이와같은 상황을 배제하기 위함이다. 또한, 만약 CRU들이 특정 PU의 주변에만 위치하고 있다면, 각 PU들이 셀 경계에 분산되어 있기 때문에 CR 릴레이 협력통신을 가능한 CRU 후보군이 줄어들고 여분의 스펙트럼 자원의 발생이 줄어들게 된다. 그래서 특정 PU의 주변에만 위치하지 않고, 모든 PU들에게 협력통신이 가능한 CRU 후보군이 위치하는 영역을 추가적으로 정하고, 이를 유효영역(Effective Area)이라 하였다. 이 유효영역은 BS 또는 CRS에서 수신한 CR 신호의 세기가 일정 threshold값이 넘는 영역으로 정한다. 이와 같은 유효영역을 적용하였을 때의 식 (5)의 Primary 전송용량 다음과 같이 쓸 수 있다.

* Primary 전송용량

$$C_P = \max_{\rho_k^{(n)}, U} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \log_2 (1 + SNR_{S \rightarrow D}^{(n)} + SNR_{S \rightarrow R \rightarrow D}^{(n)})$$

where $U = \left\{ k \mid \frac{S}{d_k^{\alpha}} \geq \text{threshold} \right\}$

(15)

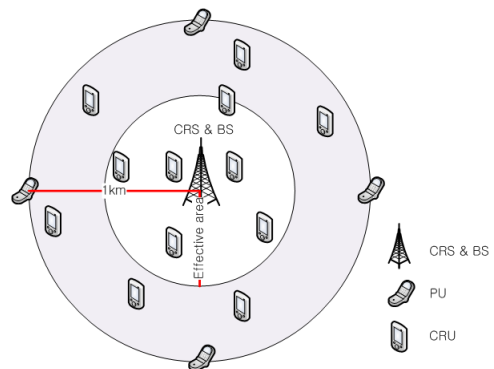


그림 7. 다수의 PU를 갖는 네트워크 환경

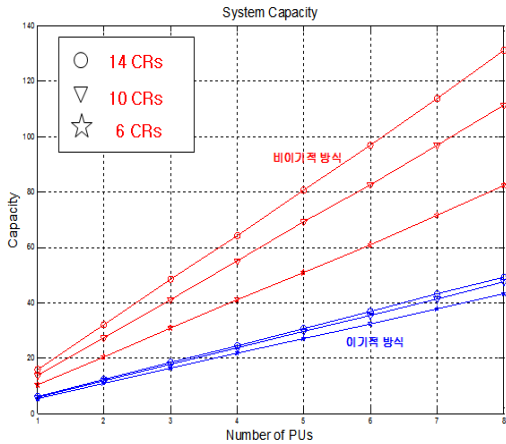


그림 8. 네트워크내의 PU와 CRU의 수에 따른 시스템 용량

이때의 U는 BS 또는 CRS에서 수신한 d_k m 만큼 떨어져 있는 k 번째 CRU 신호의 세기가 일정 threshold값이 넘는 CRU의 후보군을 말한다. 본 논문에서는 threshold값은 4 mW(6 dBm)로 정하였다. 이 값은 PU가 전송전력 P_T 로 신호를 전송할 때, Primary 네트워크의 셀 반지름의 1/2(500 m)에 해당하는 지점에서의 수신전력을 나타낸다. 그리고 식 (11)의 비이გი적 공생방식의 CR 전송용량 또한 다음과 같이 변경할 수 있다.

* CR 전송용량

$$\max_{\phi_k^{(n)}, U} \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \phi_k^{(n)} \log_2 \left(1 + \frac{E[|c_k^{(n)} x^{(n)}|^2]}{E[|v_k^{(n)}|^2]} \right) \quad (16)$$

s.t. $\phi_k^{(n)} \in \{0, 1\}, \forall k, n$

$$\sum_{k=1}^K \phi_k^{(n)} = 1, \forall n$$

where $U = \left\{ k \mid \frac{S}{d_k^2} \geq \text{threshold} \right\}$

상기의 식 (15)와 (16)를 이용해서 다수의 PU가 존재하는 네트워크에서의 효율적인 부반송파 할당을 적용한 시스템 용량을 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 계산할 수 있다.

3.2. 제안된 CR 방식의 모의실험

본 절에서는 제안된 CR방식을 적용하였을 때 시스템의 용량이 향상되는 정도를 알아보는 모의실험을 하였다. 실험의 기본환경은 표 1에 주어진 환경을 따른다. 셀 반지름은 그림 5와 같이 1km로 설정한다. 실험은 그림 5의 환경을 기반으로 각각의 PU에는 12개의 부반송파가 할당되어 있다고 가정하였

다. 이때 시스템 용량을 네트워크 내의 CRU의 수와 PU의 수를 변화시키면서 그 결과를 확인하였다.

실험의 결과를 확인하면, PU의 수가 증가하면 이기적 공생방식과 비이기적 공생방식의 전체 시스템 용량도 선형적으로 증가하였다. 그리고 유효영역내의 CRU의 수가 증가할 때도 시스템 용량이 증가하지만 그 증가량의 차이는 점점 줄어든다. 또한, 이기적 공생방식보다 비이기적 공생방식이 CRU의 수에 의한 영향이 더 큰 것을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서 분석된 결과, 하나의 PU를 갖는 네트워크 내에서 기존의 CR방식을 OFDMA 기반의 시스템에 적용하였을 때, 효율적인 부반송파 할당(비이기적 공생방식)을 통해서 시스템 용량의 극대화를 할 수 있었다. 이에 네트워크 내의 다수의 PU가 존재하는 경우로 확장하였을 때, 비이기적 공생방식이 더 큰 성능향상을 얻을 수 있었다.

또한, 실제 이와 같은 CR 방식을 실제 시스템에 적용하기 위해서 유효영역을 설정하였다. 이를 통해서 협력통신과 데이터 전송에 사용될 CRU의 후보군의 크기가 작아지기 때문에 계산 복잡도는 줄어들고, 효율성은 높일 수 있었다.

참고 문헌

- [1] J. M. Peha, "Approaches to Spectrum Sharing," IEEE Communications Magazine, Vol.43, No.2, pp. 10-12, February, 2005.
- [2] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," IEEE Personal Communications, Vol.6, No.4, pp.13-18, August, 1999.
- [3] A. Jovicic, P. Viswanath, "Cognitive Radio: an Information-Theoretic Perspective", IEEE Transactions on Information Theory, Vol.52, No.5, pp.2413-2317, July, 2006.
- [4] P. Xue, P. Gong, N Cao and D. K. Kim, "Symbiotic architecture for the cognitive radio networks with amplify-and-forward relaying cooperation", In Proc. KICS the 18th JCCI, Jeju, Korea, pp.49-54, April 23-25 2008.
- [5] O. Simeone, I. Stanojev, S. Savazzi, Y.

Bar-Ness, U. Spagnolini, and R. Pickholtz, "Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.26, No.1, pp.203-213, Jan. 2008.

[6] P. Gong, J. H. Park, J. M. Yoo, B.S. Yu and D. K. Kim "Throughput Maximization with Multiuser Non-selfish Cognitive Relaying in CR Networks", *ISWPC2009. 4th International Symposium on 11-13*, pp.1-5, Feb. 2009.

[7] J. H. Park, P. Gong, J. M. Yoo, D. K. Kim, "Throughput Maximization by Efficient Subcarrier Allocation in an OFDMA-based CR Network", *JCCI2010, Korea*, pp.597-600, May 28-30 2010.

[8] H. Mheidat, M. Uysal, "Impact of receive diversity on the performance of amplify-and-forward relaying under APS and IPS power constraints", *IEEE Communications Letters*, p.468-470, June, 2006.

[9] J. N. Laneman, "Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures", Ph. D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Aug. 2002.

[10] J. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-hill, 3rd edition, 1995.

유 정 민 (Jung-Min Yoo)

정회원



2008년 2월 인하대학교 정보통신공학과
2010년 8월 인하대학교 정보공학과 석사
2010년 12월~현재 SK C&C

김 덕 경 (Duk Kyung Kim)

종신회원



1992년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업
1994년 2월 KAIST 전기 및 전자 공학과 석사
1999년 2월 KAIST 전기 및 전자 공학과 박사
2002년 3월~현재 인하대학교

정보공학계열 정보통신공학과 교수

<관심분야> UWB, CDMA, OFDM, RRM, 4G

박 재 현 (Jae-hyun Park)

정회원



2006년 2월 인하대학교 정보통신공학과 졸업
2008년 2월 인하대학교 정보공학과 석사
2008년 3월~현재 인하대학교 정보공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신공학, TD-SCDMA, Cognitive Radio, 4G