OFDMA 셀룰러 시스템에서 펨토셀 Subchannel 할당 기법

준회원 권 정 안*, 김 병 국*, 종신회원 이 장 원*, 정회원 임 재 원**, 김 병 훈**

A Subchannel Allocation Algorithm for Femtocells in OFDMA Cellular Systems

Jeong-Ahn Kwon*, Byung-Gook Kim* *Associate Members*,
Jang-Won Lee* *Lifelong Member*, Jae-Won Lim**, Byoung-Hoon Kim** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 OFDMA를 이용하는 dedicated channel 펨토셀 시스템에서 각 펨토셀이 사용할 subchannel을 할당하는 방법에 대하여 연구한다. 본 subchannel 할당 기법은 가장 적은 수의 subchannel을 할당받는 펨토셀의 subchannel 수를 최대화 하면서 시스템 내의 펨토셀들이 사용하는 subchannel 수의 합을 최대화하는 것을 목표로 한다. 제안된 알고리즘은 interference graph 생성, 컬러링 수행, 각 컬러별 subchannel 연결의 세 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 펨토셀 시스템을 각 펨토셀을 node로, 서로 간섭을 겪는 펨토셀들을 edge로 한 interference graph로 모델링 한다. 이후 interfrence graph에 graph theory의 컬러링 기법을 이용하여 각 펨토셀에 컬러를 할당하고, 각 컬러에 subchannel들을 매핑하여, 각 펨토셀에 subchannel을 할당한다. 마지막으로 본 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

Key Words : OFDMA, Femtocell, Dedicated Channel, Coloring

ABSTRACT

In this paper, we provide a subchannel allocation algorithm for a femtocell system with OFDMA. This algorithm aims to maximize the minimum number of allocated subchannels among all femtocells and in addition, to maximize the total usage of subchannels in all femtocells. The subchannel allocation algorithm consists of three steps: constructing an interference graph, coloring algorithm, and mapping subchannels to colors. In the first step, the femtocell system is modelled by an interference graph, in which each femtocell is modeled as a node and two nodes that interfere with each other are connected by an edge. Based on this interference graph, by using a coloring scheme and mapping subchannels to each color, we can allocate subchannels to each femtocell. Finally, the performance of this algorithm is provided by simulation.

I. 서 론

현재 broadband access 기술은 크게 3GPP의 WCDMA, 3GPP2의 CDMA 2000, 그리고 IEEE 802.16/WiBro 기술로 나눌 수 있다. 이 중 IEEE 802.16/WiBro는 패킷 교환 기술을 이용하고 있고

※ 본 논문은 LG전자의 펨토셀간 interference를 고려한 펨토셀 자원 할당 기법 연구 과제와 2009년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업 (2009-0073581)의 지원을 받아 수행되었음.
* 연세대학교 전기전자공학과 통신망 연구실 (pooheup@yonsei.ac.kr, maum0312@yonsei.ac.kr, jangwon@yonsei.ac.kr)
** LG전자 (jaewon.lim@lge.com), (byoungk@lge.com)
논문번호 : KICS2010-02-046, 접수일자 : 2010년 2월 1일, 최종논문접수일자 : 2010년 4월 7일

WCDMA와 CDMA 2000은 회선 교환망을 기본으로 하고 있다. 하지만 최근 들어 인터넷 사용의 증가와 함께 고속 데이터 통신에 대한 요구가 증가하고 있고 이에 따라 유무선 망 모두 IP기반의 망으로 통합될 것으로 예측되고 있다. 이러한 미래의 망 변화에 대한 대비로 3GPP에서는 LTE 시스템을 개발하고 있으며 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.

무선 통신망을 통한 고속 데이터 통신을 가능하게 하기 위해서는 통신망 용량의 증가가 필요하다. 무선 통신의 용량을 증가시키는 방법은 여러 가지가 있지만 그 중 한 가지 방법으로는 셀의 크기를 줄이는 것이 있다. 즉, 기지국의 수를 늘려서 주파수 재사용률을 높이는 것이다. 이런 의미에서 셀의 크기를 극도로 줄여 가정용으로 활용할 수 있다면 효율적일 것으로 기대된다. 특히 가정은 대표적인 음영지역으로서, 실제로 반지하구조의 가정의 경우 가정용 소형 중계기를 사용하기도 한다. 하지만 오히려 사람들은 외부에서 이동 중인 경우에 비하여 가정 내에서 더 안정적으로 높은 전송속도를 얻기를 원할 것이다. 따라서 가정 내의 음영지역을 없애고 높은 전송률을 제공하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

이러한 문제점에 대한 해결책으로 최근 부상하고 있는 것이 펨토셀이다. 이는 각 가정에서 사용할 수 있는 초소형 기지국으로서, 가정 내에 설치된 초고속 유선 통신망을 이용하여 옥내를 커버하는 기술이다. 일반적인 기지국이나 중계기등과 구별되는 펨토셀의 특징은 IP 망에 연결되어 일반 휴대폰으로 통신을 수행한다는 점이다. 이로 인하여 보다 저렴한 비용을 들여 seamless한 통신을 이용할 수 있으며, 기존에 사용하고 있는 통신망을 이용함으로써, 자원의 낭비 또한 줄일 수 있어 중복된 서비스를 이용하기 위해 지출하는 비용을 줄일 수 있게 된다. 더불어 통신 서비스 사업자의 공급 비용 또한 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 이와 유사한 서비스들이 국내외에서 제공되어 왔다. 대표적으로 국내에서는 KT의 원폰 서비스와 LGT의 기분 ZONE 서비스를 예로 들 수 있으며, 국외에서는 프랑스의 Orange에서 제공한 Wi-fi/이동전화 dual 서비스인 Unik가 있다. 또한 미국의 SprintNextel사는 CDMA 1x 방식을 지원하는 펨토셀 서비스를 제공 하고 있다. 특히 SprintNextel사 서비스의 경우 삼성전자에서 개발한 펨토셀 장비인 유비셀이 사용되고 있어, 국내에서의 활용 역시 기대되고 있다.

이런 펨토셀을 설치하는데 있어 가장 문제가 되는 부분은 각각의 기지국이 활용할 자원의 배분문제이다. 펨토셀은 그 특성 상 셀의 크기가 매우 작고 따라서 셀간 (기지국간) 거리가 매우 짧다. 이에 따라 셀 간 간섭 (interference)이 발생하기 쉬워 인접 셀간의 자원 할당이 중요하다. 특히 기존의 매크로셀에 비하여 셀의 분포가 일정하지 않아 통신사에서 제어하기가 어렵고 인접 셀간의 협업 역시 쉽지 않다. 따라서 기존 매크로셀에서 사용되던 자원 할당 기법으로는 효율적으로 자원을 할당하기 어렵다. 하지만 이에 대한 마땅한 해결책이 제시되지는 못하였으며 앞으로 많은 연구가 필요하다.

펨토셀에 관련된 최근의 여러 연구들[1]-[4]은 대부분 CDMA 기반의 3G 통신 시스템을 그 대상으로 하고 있다. 이들은 auto-configuration 기법[1],[2], interference avoidance[3], admission control과 channel re-allocation[4]등 서로 다른 기법들을 이용하고 있으나 이들 모두 간섭 제거를 그 목표로 하고 있다. 그러나 차세대 통신망에서는 OFDMA 사용하기 때문에, 4G 시스템에는 적용하기가 어렵다는 문제가 있다. 이에 반하여 [5]와 [6]의 경우에는 OFDMA과 같이 다중 채널을 사용하는 시스템에서의 펨토셀 subchannel 할당을 다루었다. 논문 [5]에서는 매크로셀의 중심으로부터 가까운 지역과 먼 지역을 구분하여 가까운 지역에서는 매크로셀과 펨토셀이 같은 채널을 사용하도록 허용하고 먼 지역에서는 서로 다른 채널을 사용하도록 하는 채널 할당 기법을 제안하였다. 하지만 각 펨토셀 별 채널 할당 기법을 다루지 않았다. 논문 [6]에서는 cell-level subchannel 할당과 user-level scheduling의 두 단계로 이루어진 자원 할당 기법을 제안하였다. 하지만 cell-level subchannel 할당 과정이 random-access 기반으로 구성되었기 때문에 collision이 발생할 수 있어 user-level scheduling 단계에서 보다 복잡한 과정이 요구된다.

이에 본 논문에서는 OFDMA를 사용하는 시스템에서 최근 이슈가 되고 있는 펨토셀을 활용할 경우의 각 셀에서의 subchannel 할당에 관한 연구를 수행하였다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 OFDMA를 사용하는 셀룰러 시스템에서 dedicated channel 환경 (매크로셀과 펨토셀이 서로 다른 채널을 사용하는 환경)을 가정한다. 따라서 펨토셀과 매크로셀간의 간섭은 존재하지 않으며, 펨토셀간의 간섭만 고려하도록 한다. 또한 펨

토셀간의 직접적인 링크는 존재하지 않고, 따라서 일정수의 펨토셀들을 관리하는 별도의 펨토셀 게이트웨이 (femto-GW)가 존재한다고 가정한다. 펨토셀간의 자원할당은 이러한 femto-GW에서 이루어지며, femto-GW는 각 펨토셀들이 사용할 자원을 결정한 후 이 결과를 각 펨토셀에 알려주도록 한다.

OFDMA 시스템의 주파수 대역은 C개의 subchannel로 나누어져 있으며, 각 subchannel은 동일한 수의 subcarrier로 구성된다. 본 논문에서는 이러한 subchannel을 자원 할당의 기본 단위로 한다. 시스템내에는 F개의 펨토셀이 존재한다. 각 펨토셀 f에는 여러 개의 subchannel들이 할당될 수 있으며. 이를 표현하기 위하여 subchannel 할당 식별자 $q_{c,f}$를 다음과 같이 정의한다.

$$q_{c,f}=\begin{cases}1, & \text{if subchannnel } c \text{ is assigned to femtocell } f\\ 0, & \text{otherwise.}\end{cases}$$

이러한 각 펨토셀들은 서로 간섭이 발생할 수도 있고, 발생하지 않을 수도 있다. 본 논문에서 각각의 펨토셀은 인접 펨토셀의 신호 세기가 시스템에서 미리 정의한 threshold를 초과할 경우 간섭이 발생한다고 판단하며, 간섭이 발생하는 펨토셀들을 이웃 펨토셀이라 정의한다. 펨토셀 f와 f'이 서로 이웃 펨토셀인지를 나타내는 이웃 펨토셀 식별자 $h_{f,f'}$를 다음과 같이 정의한다.

$$h_{f,f'}=\begin{cases}1, & \text{if femtocell } f' \text{ is a neighbor femtocell of femtocell } f\\ 0, & \text{otherwise.}\end{cases}$$

본 논문에서는, 두 펨토셀 사이의 위와 같은 관계가 symmetric이라 가정한다. 따라서 $h_{f,f'}=h_{f',f}\forall f,f'$의 조건이 성립한다. 이웃 펨토셀들은 같은 subchannel을 사용할 수 없기 때문에 할당 식별자의 벡터 $\bar{q}$는 다음의 조건 집합 Q에 포함되어야 한다.

$$Q=\{\bar{q}\,|\,q_{c,f}+q_{c,f'}\le 1 \text{ if } h_{f,f'}=1\ \forall f,f'\}$$

각 펨토셀은 주기적으로 주변 펨토셀들의 신호를 측정하여 이웃 펨토셀 목록을 유지하며, 이를 femto-GW에 전송한다. Femto-GW는 각 펨토셀들로부터 수집한 정보를 바탕으로 subchannel 할당 알고리즘을 수행하며, 그 결과를 각 펨토셀에 전달한다. 이렇게 할당된 subchannel은 상기의 과정이

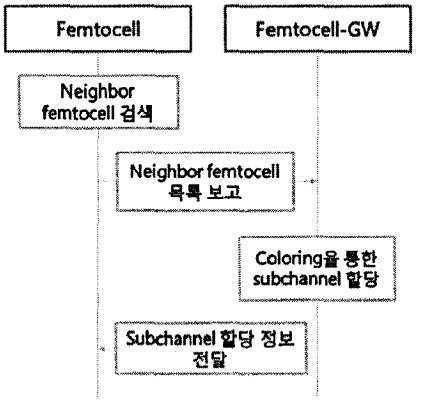


그림 1. 펨토셀 subchannel 할당 과정

다시 수행되기 전까지 유지된다. 이러한 과정은 그림 1에 나타나있다.

Ⅲ. 펨토셀 subchannel 할당 기법

본 장에서는 각 펨토셀에 대한 subchannel 할당 기법에 대하여 설명하도록 한다. 본 알고리즘의 첫 번째 목표는 모든 펨토셀 중 가장 적은 양의 subchannel을 할당받는 펨토셀의 subchannel 수를 최대화 하는 것 (fairness)이며, 이러한 조건하에서 모든 펨토셀에서 사용되는 subchannel 합을 최대화 하는 것 (efficiency)이 두 번째 목표이다. 이러한 알고리즘의 목표는 다음의 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}&\underset{\bar{q}}{\text{maximize}}\ E(\bar{q})\\ &\text{subject to } \bar{q}\in\underset{\bar{q}\in Q}{\arg\max}\,R(\bar{q})\end{aligned}$$

이때 최소 subchannel 할당 개수 $R(\bar{q})$와 모든 펨토셀에서 사용되는 subchannel의 합 $E(\bar{q})$는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$R(\bar{q})=\min_{f}\sum_{c=1}^{C}q_{c,f}$$

$$E(\bar{q})=\sum_{f=1}^{F}\sum_{c=1}^{C}q_{c,f}$$

본 subchannel 할당 문제는 그래프 이론의 coloring 문제로 모델링할 수 있으며, 특히 최소의 컬러로 컬러링을 수행하는 컬러링 문제와 유사한 형태로 나타난다. 다만 기존의 문제와는 다르게 하

나의 node (펨토셀)에 여러 컬러가 중복되어 할당될 수 있다. 하지만 이는 NP-complete 문제이고 일반적으로 풀기 어렵다고 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 위 문제를 해결하기 위해 graph coloring에 기반을 둔 heuristic subchannel 할당 기법을 제안하도록 한다. 본 subchannel 할당 기법은 interference graph 생성, 컬러링 알고리즘 수행, 각 컬러별 subchannel 대응의 세 단계로 구성되어 있다.

3.1 Interference graph 생성

컬러링 기법을 적용하기 위해서는 펨토셀들의 배치를 그래프로 표현해야 한다. 그림 2의 왼쪽 그림과 오른쪽 그림은 각각 펨토셀 들의 배치와 이에 해당하는 interference graph를 나타낸다. interference graph에서는 각 펨토셀을 node로, 펨토셀간의 간섭 관계를 edge로 나타낸다. 왼쪽 그림의 펨토셀 2와 3과 같이 두 펨토셀의 커버리지가 겹칠 경우, 이 두 펨토셀을 서로의 이웃 펨토셀로 판단하고 대응되는 interference graph의 두 node 사이를 edge로 연결함으로써 interference graph를 만든다. 이때 각 node들 간 edge의 존재 유무는 이전단계에서 각 펨토셀들이 femto-GW에 보고한 정보를 바탕으로 구성하도록 한다.

이렇게 작성한 interference graph를 바탕으로 femto-GW가 subchannel 할당을 위한 컬러링 알고리즘을 수행한다.

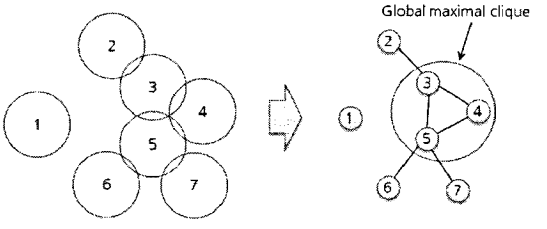


그림 2. 각 펨토셀의 interference 영역과 이에 의해 결정되는 interference graph

3.2 컬러링

컬러링은 앞에서 구한 interference graph를 바탕으로 하여 각 컬러를 서로 인접하지 않는 펨토셀들에 할당하는 과정이다. 따라서 서로 연결된 node들에는 동일한 컬러가 할당될 수 없다. 본 논문에서 각 컬러에는 서로 중복되지 않는 subchannel들이 대응되며 각 펨토셀은 자신이 할당받은 컬러에 해당하는 subchannel을 할당받게 된다. 이때, 사용되는 컬러의 수가 많을수록 상대적으로 적은 양의 subchannel이 각 컬러에 할당되므로 사용되는 컬러 수가 적을수록 fairness가 좋아진다. 또한 하나의 컬러에 대해 할당 받은 펨토셀이 많을수록 시스템의 주파수 재사용률이 높아져 시스템의 efficiency가 높아지게 된다.

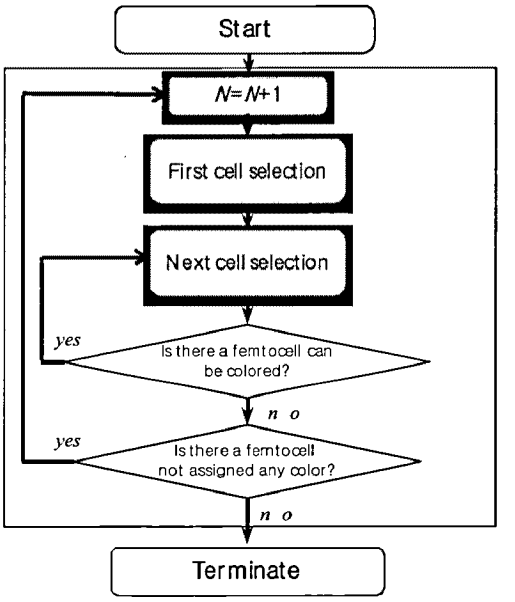


그림 3. 컬러링

각 컬러를 펨토셀에 할당하는 과정은 해당 컬러에 대한 첫 펨토셀을 결정하는 'first cell selection'과 반복적으로 다음 펨토셀을 결정하는 'next cell selection'으로 이루어져 있다. 기본적으로 first cell selection 과정에서는 fairness를 위하여 컬러(subchannel)를 할당 받지 못한 펨토셀을 우선적으로 선택하고, next cell selection에서는 efficiency를 높이기 위해서 보다 많은 펨토셀에 동일한 컬러를 할당하는 것을 목표로 한다. 본 알고리즘은 이러한 과정이 반복적으로 수행되며, 이러한 과정은 모든 펨토셀이 적어도 하나의 컬러를 할당 받았을 때까지 수행된다. 이는 그림 3에 나타나 있다.

N은 컬러링 과정 종료 후 최종적으로 할당한 컬러의 수를 의미한다. 이러한 컬러링 알고리즘에서 First cell selection과 Next cell selection 과정은 다음 장에서 자세히 설명하도록 하겠다.

3.3 각 컬러 별 subchannel 대응

각 펨토셀이 사용할 자원은 subchannel이므로, 실제로 할당할 자원은 컬러가 아닌 subchannel이다. 따라서 컬러링 알고리즘의 수행 후 각 컬러에 대응

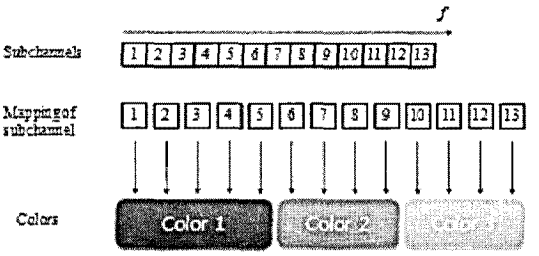


그림 4. 컬러별 subchannel 할당의 예

하는 subchannel을 대응시켜 주어야 한다. 본 논문의 목적은 각 펨토셀들에게 최대한 비슷한 양의 subchannel을 대응시켜 주는 것이므로, 모든 컬러에 동일한 양의 subchannel을 대응시키는 것이 좋다. 하지만, 실제로 subchannel의 수는 정수이고 컬러의 수로 나누어떨어지지 않는 경우가 빈번히 발생할 것이다. 따라서 각 컬러에 대응되는 subchannel의 수는 동일하지 않을 수 있다. 이 경우, 쉽게 생각해 볼 수 있는 방법은 각 컬러에 동일하게 $\lfloor C/N \rfloor$ 개의 subchannel을 대응시킨 후 남은 subchannel을 각기 다른 컬러에 할당 하는 방식이 될 것이다. 그림 4는 C=13, N=3인 경우의 컬러별 subchannel 대응의 예를 보여준다. 모든 컬러에 동등하게 4개의 subchannel을 대응시킨 후 나머지 하나의 subchannel을 컬러1에 할당하였다.

실제 시스템에서는 이외에도 여러 가지 방법의 대응 방법이 있을 수 있다. 예를 들어, 컬러의 개수가 subchannel의 수보다 많을 경우에는 time sharing을 사용할 수도 있을 것이며, 필요에 따라서는 컬러별 subchannel의 수를 다르게 하여 시스템의 효율을 높일 수도 있을 것이다.

Ⅳ. 컬러링 알고리즘

컬러링 알고리즘에 대해 논의하기에 앞서 interference graph의 분석을 위해 다음의 용어들을 정의하도록 한다.

(1) Clique: 모든 node들이 서로 연결된 node들의 집합
(2) Maximal clique: 다른 clique에 포함되지 않는 clique
(3) Clique의 크기: clique내에 포함된 node의 수
(4) Global maximal clique: 모든 maximal clique 중 크기가 제일 큰 maximal clique

하나의 clique 내에 포함된 펨토셀 (node)들은 같은 subchannel을 재사용할 수 없기 때문에, global maximal clique내의 각 펨토셀이 할당받을 수 있는 주파수 subchannel의 비율 $R(\bar{q})/C$는 그 크기의 역수를 초과할 수 없다. 즉, χ를 global maximal clique이라 할 때

$$\frac{R(\bar{q})}{C} = \min_f \frac{\sum_{c=1}^{C} q_{c,f}}{C} \le \frac{1}{|\chi|} \quad (1)$$

의 관계가 성립한다. 따라서 $C/|\chi|$가 $R(\bar{q})$의 upper bound이고, $|\chi|$가 컬러수의 lower bound라 할 수 있다. (그러나, odd-hole과 같이 subchannel 할당을 어렵게 만드는 요소들로 인하여 대부분의 경우 upper bound에 도달하지 못하게 된다[7].)

각 컬러에는 subchannel들이 할당되어 있기 때문에 이웃 펨토셀들은 동일한 컬러를 할당 받지 못한다. 따라서 컬러링 알고리즘은

$$p_{n,f} + p_{n,f'} \le 1 \text{ if } h_{f,f'} = 1, \ \forall f, f',$$

조건을 만족해야 한다. 이때 $p_{n,f}$는 각 펨토셀 f에 컬러 n이 할당되었는지를 나타내는 식별자이다.

$$p_{n,f} = \begin{cases} 1, & \text{if color } n \text{ is assigned to femtocell } f \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

각 컬러에 할당된 subchannel의 수가 동일하다고 가정하면, 가장 적은 subchannel을 할당받은 펨토셀의 subchannel 수는 N이 컬러링에 필요한 컬러의 수를 나타낼 때,

$$\min_f R(\bar{q}) = \min_f \sum_{c=1}^{C} q_{c,f} = \min_f \frac{C}{N} \sum_{n=1}^{N} p_{n,f}$$

가 된다. 본 컬러링 알고리즘은 모든 펨토셀이 하나 이상의 컬러를 할당받으면 종료되므로, 가장 마지막에 컬러를 할당받은 펨토셀은 하나의 컬러만을 할당받게 된다. 이는 아래와 같이 최소의 컬러를 할당받는 펨토셀이 된다.

$$\min_f \sum_{n=1}^{N} p_{n,f} = 1$$

따라서 펨토셀 중 최소 subchannel 할당량은

$$\min_f R(\bar{q}) = \min_f \sum_{c=1}^{C} q_{c,f} = \frac{C}{N}$$

를 만족한다. 이때 전체 subchannel 수 C는 고정되어 있으므로 $R(\bar{q})$를 최대화하기 위해서는 최종 컬러 수 N을 최소화해야 한다. 이론적으로 N은 global maximal clique의 크기 $|\chi|$와 같으므로 global maximal clique내의 각 펨토셀에게 서로 다른 컬러를 할당하고 이를 바탕으로 컬러링을 수행하는 것이 최적의 해가 된다. 하지만 clique을 찾는 것은 NP-complete 문제로서 complexity가 매우 높다. 더욱이 앞에서 말한 바와 같이 odd-hole등의 문제로 upper bound를 만족시킬 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 알고리즘의 complexity를 낮추고, 다양한 topology에 대한 subchannel 할당을 가능하게 하기 위해서, 다음과 같은 heuristic 알고리즘을 제안하도록 한다.

4.1 First cell selection

먼저, first cell selection에 대하여 고려해 보도록 한다. 앞에서 말했듯이 global maximal clique의 크기 (즉, $|\chi|$)가 사용되는 컬러수의 최소값이 된다. 따라서 global maximal clique내의 펨토셀들에게 우선적으로 컬러를 할당해주어야 한다. 이런 관점에서, 각 컬러가 가장 먼저 할당되는 first cell로 global maximal clique에 존재하는 펨토셀을 선택하는 것이 컬러 수 N을 최소화 하는데 유리하다. 하지만 global maximal clique들을 찾기가 어려우므로 global maximal clique내에 존재할 확률이 높은, 즉 degree가 가장 큰 펨토셀을 찾도록 한다. 그래프 이론에서 노드의 degree는 edge로 연결된 이웃 노드의 수로 정의된다. 또한 first cell 선택시, 아직 다른 컬러를 할당받지 못한 펨토셀을 우선적으로 고려하여 가능한 빨리 모든 펨토셀이 컬러를 할당받을 수 있도록 한다. 이는 컬러의 수를 최소화하는 데에 도움을 준다. First cell selection 과정의 기본 strategy는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- *First cell selection: Largest-first selection*
  - 이전 단계까지, 아무런 컬러도 할당받지 못한 펨토셀들 중에서 degree가 가장 큰 펨토셀을 선택

위의 Largest-first selection을 실제 시스템에 적용하기 위해서는 별도의 펨토셀간의 간섭에 대한 정보를 필요로 하며 이로 인한 signaling overhead가 발생한다. 또한 시스템에 따라 펨토셀간 간섭정보를 제공하기 어려울 수 있다. 따라서 이런 경우에는 다음의 strategy를 따르도록 한다.

- *First cell selection: Random selection*
  - 이전 단계까지, 아무런 컬러도 할당받지 못한 펨토셀들 중에서 임의의 펨토셀을 선택

4.2 Next cell selection

First cell selection 과정 이후 해당 컬러를 할당할 다른 펨토셀들을 찾는 next cell selection 과정이 필요하다. 이 과정에서 본 논문의 첫 번째 목적인 fairness를 위해, first cell selection과 마찬가지로, 다른 컬러가 할당되지 않은 펨토셀들을 먼저 고려하도록 한다. 즉, 아무런 컬러를 할당받지 못한 펨토셀 중에서 next cell을 우선적으로 선택하고 이후 그 외의 펨토셀들을 대상으로 next cell을 선택하도록 한다.

앞에서 언급했듯이 시스템의 efficiency를 높이기 위해서는 각 컬러를 보다 많은 펨토셀들에게 할당해주어야 한다. 이를 next cell selection 과정에 반영하기 위하여, 현재 컬러가 할당된 펨토셀들로부터 가장 가까운 위치에 있는 펨토셀들에게 해당 컬러를 할당해 주도록 한다. 이는 가까운 펨토셀을 선택할수록 추후에 보다 많은 펨토셀들을 컬러링에 고려할 수 있어 궁극적으로 하나의 컬러를 많은 셀들에게 할당할 수 있기 때문이다.

이에 따른 next cell selection 과정의 strategy는 다음과 같다.

- *Next cell selection: Nearest-first selection*
  - 현재 컬러를 할당받을 수 있는 펨토셀들 중 다른 컬러를 할당받지 못한 펨토셀들이 존재하면
    - ㅇ이러한 펨토셀들 중 현재 컬러를 할당받은 펨토셀들로부터 가장 가까운 거리에 있는 펨토셀 선택
  - 현재 컬러를 할당받을 수 있는 모든 펨토셀들이 적어도 하나의 컬러를 할당 받았다면
    - ㅇ현재 컬러를 할당받을 수 있는 펨토셀들 중 현재 컬러를 할당받은 펨토셀들로부터 가장 가까운 거리에 있는 펨토셀 선택

위의 Nearest-first selection과 알고리즘을 적용하기 위해서는 펨토셀간 간섭에 대한 정보 이외에도 각 펨토셀의 위치정보가 필요하다. 이러한 정보를 제공하기 어려운 상황인 경우 다음의 strategy를 따르도록 한다.

- *Next cell selection: Random selection*
  - 현재 컬러를 할당받을 수 있는 펨토셀들 중 다른컬러를 할당받지 못한 펨토셀들이 존재한다면
    - ○이러한 펨토셀들 중 임의의 펨토셀 선택
  - 현재 컬러를 할당받을 수 있는 모든 펨토셀들이 적어도 하나의 컬러를 할당 받았다면
    - ○현재 컬러를 할당받을 수 있는 펨토셀들 중 임의의 펨토셀 선택

이러한 strategy를 따라 반복해서 next cell selection을 수행하도록 한다. 만약 더 이상 next cell의 조건에 부합하는 펨토셀이 존재하지 않는다면, next cell selection 과정은 종료된다. 이후, 아무런 컬러를 할당 받지 못한 펨토셀이 존재한다면, 새로운 컬러를 이용하여 first cell selection 과정부터 반복하고, 존재하지 않는다면 컬러링 알고리즘은 종료된다.

V. 성능 분석

본 장에서는 시뮬레이션을 통한 성능 분석에 대하여 논하도록 한다. 각 펨토셀이 원형으로 이루어져 있고, 전체 구역의 반경은 1000m, 각 펨토셀의 반경이 100m인 상황에서 펨토셀을 무작위로 배치하는 Monte-carlo 시뮬레이션을 이용하였다. 전체 subchannel의 수는 25개이다.

그림 5와 그림 6, 그림 7에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 비교 분석한다. 우선, 편의를 위해 본 논문에서 제안한 네 가지 알고리즘을 first cell selection 과 next cell selection 방법에 따라 'Largest-Nearest', 'Largest-Random', 'Random-Nearest', 'Random-Random' 으로 부르기로 한다. 추가적으로 Greedy 컬러링 알고리즘과의 성능을 비교한다. Greedy 컬러링 알고리즘은 이웃 노드의 수가 가장 많은 노드의 순서대로 컬러를 하나씩 할당하며, 이 때 미리 순서가 정해진 컬러들 중 가능한 가장 앞선 순서의 컬러를 할당하는 기법이다. Greedy 컬러링 알고리즘은 모든 노드에게 하나의 컬러를 할당하기 위한 컬러의 수를 최소화 하는 것

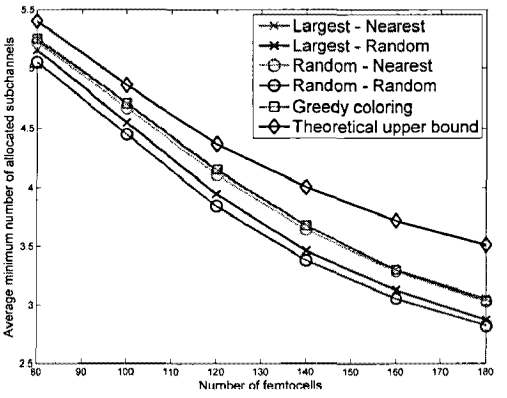


그림 5. 최소 subchannel 할당량

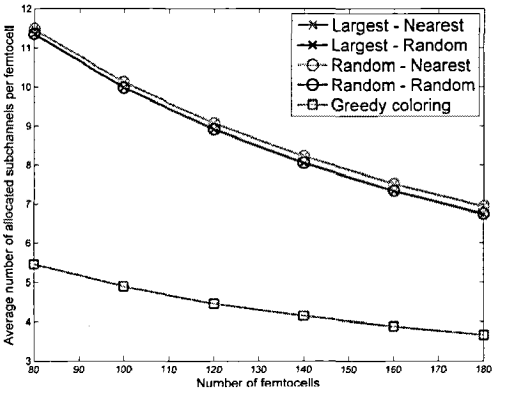


그림 6. 펨토셀 당 subchannel 할당량

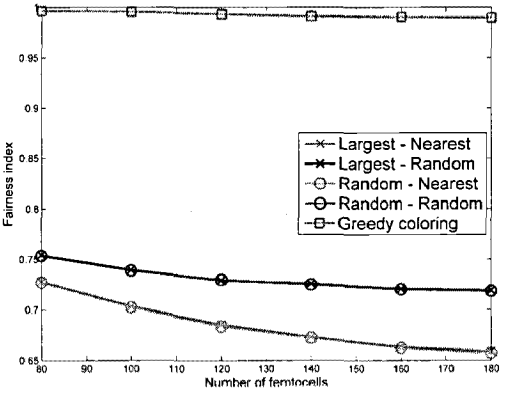


그림 7. Fairness Index

을 목표로 하기 때문에, 펨토셀의 subchannel에 적용될 경우 모든 펨토셀이 가능한 같은 수의 subchannel을 할당받게 될 것이다.

그림 5는 각 알고리즘의 최소 subchannel 할당량의 평균값과 최소 subchannel 할당량의 upper bound

의 평균값을 펨토셀의 수를 변화시키며 나타낸 것이다. 최소 subchannel 수의 upper bound는 식 (1)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R(\bar{q}) = \leq \frac{C}{|\mathcal{N}|}$$

그림 5에서는 이론적인 upper bound에는 미치지 못하지만 Greedy 컬러링 알고리즘이 가장 높은 성능을 제공하고 'Largest-Nearest'와 'Random-Nearest'가 그에 근접하는 성능을 제공한다. 반면, next cell을 임의로 선택하는 알고리즘들은 Greedy 컬러링 알고리즘에 못 미치는 성능을 제공하였다. 이를 통해서 가능한 가까운 노드를 next cell로 선택하는 것이 전체 subchannel 할당량뿐만 아니라 최소 subchannel 할당량 또한 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만 next cell을 임의로 선택하는 알고리즘들도 심각한 성능열화를 보이지는 않으므로 signaling overhead를 고려한다면 좋은 subchannel 할당 기법이라고 할 수 있다.

그림 6에서는 각 알고리즘의 펨토셀 당 subchannel 할당량인 $E(\bar{q})/F$의 평균값을 펨토셀의 수를 변화시키며 나타내었다. 그림 6에서와 같이 네 가지 알고리즘 모두 Greedy 컬러링 알고리즘을 상회하는 성능을 보여주었다. 특히 가까운 펨토셀을 next cell로 선택하는 알고리즘들이 random으로 next cell을 선택하는 알고리즘에 비해 높은 성능을 제공하였다. 이는 각 subchannel을 가능한 많은 펨토셀에 할당함으로써 높은 주파수 효율을 달성할 수 있음을 보여준다. 'Largest-Nearest' 알고리즘은 최소 subchannel 할당량에서 뿐만 아니라 펨토셀 당 subchannel 할당량에서도 가장 높은 성능을 얻었다. 또한 first cell 선택 방법은 펨토셀 당 subchannel 할당량에 거의 영향을 미치지 않는 반면, next cell 선택 방법에 따라 성능 차이를 보임을 볼 수 있다. 이를 통해 가능한 가까운 노드를 next cell로 선택함으로써 컬러를 가능한 많은 펨토셀에 할당할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 next cell을 임의로 선택하는 알고리즘들도 펨토셀 당 subchannel 할당량에서 근접한 성능을 제공하였다.

그림 7에서는 각 알고리즘의 Jain's fairness index[8]를 비교하였다. Jain's fairness index는 $E_f = \sum_{c=1}^{C} q_{c,f}$ 일 때,

$$f(\bar{E}) = \frac{\left(\sum_f E_f\right)^2}{F\sum_f E_f^2}$$

와 같이 정의되며, 수치가 높을수록 모든 펨토셀이 유사한 수준의 subchannel 수를 할당받음을 의미한다. Fairness index의 경우 first cell 선택 방법에 의한 성능차이는 거의 없었으며, 앞선 그림들에서와 달리 next cell을 임의로 선택하는 'Largeset-Random'과 'Random-Random'이 높은 성능을 제공하였다. 이는 가까운 펨토셀을 next cell로 선택 하는 'Largest-Nearest'와 'Random-Nearest'가 높은 수치의 최소 subchannel 할당량을 제공하면서도 subchannel 의 사용률을 높이기 위해 일부 펨토셀에 많은 subchannel을 할당하기 때문이다. Greedy 컬러링 알고리즘의 경우, 1에 가까운 높은 fairness index 수치를 보여준다. 하지만 앞서 말했듯이 Greed 컬러링 알고리즘은 모든 펨토셀에 하나의 컬러를 할당 하는 것을 목표로 하므로 subchannel의 사용률을 고려하지 않은 채 모든 펨토셀이 가능한 같은 수의 subchannel을 할당받게 된다. 따라서 Greedy 컬러링 알고리즘은 높은 fairnness index 수치에도 불구하고 6에서와 같이 subchannel 사용 측면에서 매우 낮은 효율을 제공하므로 펨토셀 시스템의 subchannel 할당 알고리즘으로는 적합하지 못하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 펨토셀 시스템에서 컬러링 기법을 이용하여 각 펨토셀이 사용할 subchannel을 할당하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구는 펨토셀 시스템의 fairness와 efficiency를 동시에 고려하기 위해 펨토셀 중 최소 subchannel 할당량과 전체 subchannel 사용량의 최대화를 목표로 하였으며, 각 컬러의 first cell과 next cell의 선택 방법에 따라 네 가지의 다른 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해서 이웃 셀이 많은 펨토셀에 우선적으로 subchannel을 할당하고, 가장 가까운 펨토셀의 순서대로 각 subchannel을 가능한 많은 펨토셀에 할당함으로써 ('Largest-Nearest') fairness와 efficiency 측면에서 모두 높은 성능을 제공할 수 있음을 보였다. 또한 펨토셀에 대한 위치 정보가 부족할 경우 first cell과 next cell을 임의로 선택하는 방법

('Randon-Random')을 제안하였다. 이는 'Largest -Nearest'와 비교해 봤을 때, 최소 subchannel 할당량에서는 성능 열화가 있지만, 전체 subchannel 할당량에서는 근접한 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 따라서 비록 성능 열화는 있지만, signaling overhead를 줄일 수 있다는 측면에서 고려 가능한 자원 할당 기법이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] H. Claussen, "Performance of Macro- and Co-Channel Femtocells in a Hierarchical Cell Structure," IEEE PIMRC, Sept., 2007.

[2] L. T. W. Ho and H. Claussen, "Effects of User-Deployed, Co-Channel Femtocells on the Call Drop Probability in a Residential Scenario," IEEE PIMRC, Sept., 2007.

[3] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Uplink Capacity and Interference Avoidance for Two-Tier Cellular Networks," IEEE GLOBECOM, Nov., 2007.

[4] X. Li, L. Qian, and D. Kataria, "Downlink Power Control in Co-Channel Macrocell," IEEE CISS, Mar., 2009.

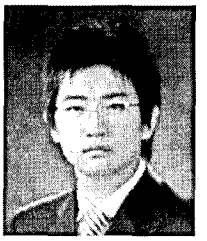
[5] K. Sundaresan and S. Rangarajan "Efficient Resource Management in OFDMA Femto Cells," ACM MobiHoc, May., 2009.

[6] Ismail Guvenc et. al. "A Hybrid Frequency Assignment for Femtocells and Coverage Area Analysis for Co-Channel Operation," IEEE Communications Letters, Vol.12, No.12, pp.880-882, Dec., 2008.

[7] L. Chen, S. H. Low and J. C. Doyle, "Joint Congestion Control and Media Access Control Design for Ad Hoc Wireless Networks," IEEE INFOCOM, Mar., 2005.

[8] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," Tech. Rep., Sept., 1984.

권 정 안 (Jeong-Ahn Kwon) 준회원



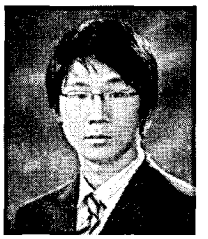
2006년 2월 연세대학교 전기전자 공학부 학사

2008년 2월 연세대학교 전기전자 공학부 석사

2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자 공학부 박사 과정

<관심분야> 통신네트워크 프로토콜, 네트워크 자원할당, 다계층 최적화, cognitive radio

김 병 국 (Byung-Gook Kim) 준회원

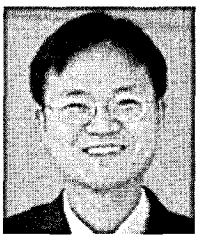


2007년 8월 연세대학교 전기전자 공학부 학사

2007년 9월~현재 연세대학교 전기전자 공학부 석박사 통합과정

<관심분야> Opportunistic scheduling in communication networks, Multi-hop relaying, Femtocell

이 장 원 (Jang-Won Lee) 종신회원



1994년 2월 연세대학교 전자공학과 학사

1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사

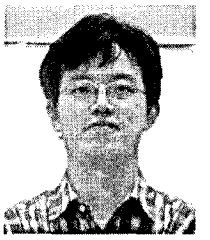
2004년 8월 미국 Purdue Univ. Electrical & Computer Eng. 박사

2004년 9월~2005년 8월 Princeton Univ. Post Doc.

2005년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수

<관심분야> 통신네트워크 프로토콜, 네트워크 자원할당, 다계층 최적화

임 재 원 (Jae-Won Lim) 정회원



2002년 8월 한성대학교 컴퓨터공학과 공학사

2006년 8월 연세대학교 컴퓨터과학과 공학석사

2006년 8월~현재 LG전자, 주임연구원

<관심분야> 이동 통신 MAC Layer, SON, Femto Network System, Ubiquitous Sensor Network, LBS

김 병 훈 (Byoung-Hoon Kim) 정회원

1994년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사
1996년 2월 서울대학교 전자공학과 공학석사
2000년 8월 서울대학교 전기전자컴퓨터공학부 공학박사
2000년 8월~2003년 3월 GCT Semiconductor, Staff Engineer
2003년 8월~2008년 3월 Qualcomm, Senior Staff Engineer/Manager
2008년 3월~현재 LG전자, 상무/연구위원
<관심분야> 이동 통신 Physical Layer, Cross Layer 설계, Relay, 협력 통신, MIMO, SON, WLAN