

펄토셀 네트워크에서 그래프 컬러링을 이용한 동적채널할당 방법

김 세 진*, 조 일 권*, 김 이 강**, 조 충 호^o

Dynamic Channel Assignment Scheme Using Graph Coloring in Femtocell Networks

Se-Jin Kim*, IlKwon Cho*, Yi-Kang Kim**, Choong-Ho Cho^o

요 약

본 연구에서는 펄토 기지국 (Access Point: AP) 밀도가 높은 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) 기반 펄토셀 네트워크 환경에서 하향링크 시스템 성능 향상을 위한 그래프 컬러링 기반 동적채널할당 (Graph Coloring based Dynamic Channel Assignment: GC-DCA) 방법을 연구한다. 제안하는 GC-DCA는 그래프 컬러링을 이용한 펄토 AP 그룹화 단계와 펄토 사용자 단말 (User Equipment: UE)의 신호 대 잡음비 (Signal to Interference plus Noise Ratio: SINR)을 고려한 동적채널할당 단계로 구성된다. 시뮬레이션을 통해 평균 펄토 UE 전송률과 펄토 UE 가 요구하는 전송률을 만족하지 못하는 펄토 UE 확률을 분석한 후, 제안하는 GC-DCA 가 다른 채널할당 방법들 보다 우수함을 보인다.

Key Words : OFDMA, Femtocell network, Dynamic channel assignment, Graph coloring, Interference avoidance

ABSTRACT

In this paper, we proposed a Dynamic Channel Assignment (DCA) scheme called Graph Coloring based DCA (GC-DCA) to improve system performance for downlink femtocell networks with high density femto Access Point (AP) deployments. The proposed scheme consists of two steps: one is a femto AP grouping step considering interference and the other is a DCA step considering Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) for femto User Equipments (UEs). Simulation results show that the proposed GC-DCA outperforms other schemes in terms of the mean femto UE capacity and probability of femto UEs which have capacities less than a given transmit rate.

I. 서 론

최근 스마트폰과 태블릿 PC (아이패드, 갤럭시탭 등) 보급이 급속도로 확산되면서 모바일 데이터 트래

픽이 급속하게 증가하고 있다¹⁾. 이와 같이 폭발적으로 증가하는 트래픽을 분산하고 양질의 서비스를 고객에게 제공하기 위해, 세계 주요 이동통신사들은 펄토셀(Femtocell)과 와이파이(Wi-Fi) 활용에 투자를 확

※ 본 연구는 한국정보사회진흥원 KOREN 연구과제(11-951-1-001) 지원으로 수행되었습니다.

• 주저자: University of British Columbia, 전자컴퓨터공학과, kimsejin@ece.ubc.ca, 정회원

o 교신저자: 고려대학교 컴퓨터정보학과 데이터통신및네트워크 연구실, chcho@korea.ac.kr, 중신회원

* 한국정보사회진흥원 디지털인프라단, ikcho@nia.or.kr, 정회원

** 고려대학교 전산학과 데이터통신및네트워크 연구실, kimyigang@korea.ac.kr, 학생회원

논문번호: KICS2012-12-572, 접수일자: 2012년 12월 21일, 최종논문접수일자: 2013년 4월 11일

대하고 있다. 이동통신 사업자가 펠토셀을 활용한다면, 네트워크 구축비용 절감, 주파수 부하 감소, 그리고 통화품질 향상과 같은 다양한 장점을 보유하게 된다. 또한, 궁극적으로 고속의 이동성과 트래픽 수용을 보장하는 무선 브로드밴드 망으로의 진화는 필수적이기 때문에, 이동통신 사업자들은 데이터 트래픽의 우회망으로 와이파이가 보다 LTE와 같은 4G 네트워크에서 펠토셀 활용을 선호하고 있다^[2].

펠토셀 연구는 일반적인 가정집 환경을 고려한 주거형 펠토망 (Residential femtocell network) 환경에서 간섭 및 성능향상을 위한 연구가 주로 진행되어 왔지만, 최근 시장성이 더 높을 것으로 예상되는 기업형 펠토망 (Enterprise femtocell network) 환경에 관심이 집중되고 있으며 현재 기업형 펠토망 모델에 대한 표준화 및 관련기술 개발이 준비단계에 있다. 기업형 펠토망은 일반적으로 주거형 펠토망 보다 많은 수의 펠토 기지국 (Access Point: AP) 이 배치되기 때문에 펠토 AP 사이의 간섭증가와 시스템 용량 감소 등의 문제들이 유발된다. 따라서, 기업형 펠토망의 성능향상을 위해 간섭을 고려한 효율적 무선 채널할당 방법이 시급히 필요하다.

펠토셀 네트워크에서 무선 채널할당 방법은 크게 정적채널할당 (Static channel assignment) 방법과 동적채널할당 (Dynamic channel assignment) 방법으로 구분된다^[3]. 정적채널할당 방법은 고정된 채널 수를 각 펠토 AP 에게 할당하는 방법으로, 펠토 AP는 펠토 사용자 단말 (User Equipment: UE)의 전송률에 따라 무선 채널이 부족하거나 여분의 채널을 낭비하는 문제가 있다. 반면, 동적채널할당 방법은 펠토 AP 또는 펠토 UE 에 대한 간섭 및 전송률에 따라 유동적으로 무선 채널을 할당함으로써 정적채널할당 방법의 단점을 보완할 수 있지만, 알고리즘 측면에서 정적채널할당 방법보다 상대적으로 복잡한 단점이 있다. 또한, 펠토셀 네트워크에서 채널할당 방법은 거주형 펠토망과 기업형 펠토망으로 분류할 수 있다^[4,9]. 거주형 펠토망의 특징은 각 닥내에 1~3개에 해당하는 소수의 펠토 AP가 설치되기 때문에 펠토 AP 사이의 간섭 보다는 매크로셀과 펠토셀 사이의 간섭을 주로 고려하였다^[4,7]. 즉, 거주형 펠토망에서 채널할당 방법은 각 매크로 기지국 (Base Station: BS)이 3 섹터 지향성 안테나를 사용하여 매크로셀간 간섭을 회피하고, 펠토 AP들은 매크로셀이 각 섹터에서 사용하지 않는 채널을 사용하는 방법으로 매크로셀과의 간섭을 완화하였다. 또한, Fractional Frequency Reuse 방법을 이용하여 매크로셀 커버리지의 안쪽과 바깥쪽에 서로 다른

주파수를 할당하고, 펠토 AP들이 매크로 BS와 다른 채널을 이용하여 동일한 매크로셀에서 매크로 BS 가 펠토 AP들에게 주는 간섭영향을 완화하였다. 반면, [8]-[9]는 기업형 펠토망 환경에서 펠토 AP 사이의 간섭을 주로 고려하였으며, 각각 분산형(Distributed)과 중앙집중형(Centralized) 동적채널할당 방법을 제안하였다. [8]은 펠토 AP 들이 서로 메시지를 교환하여 동적채널할당 유무를 결정하며, 주변 펠토 AP 들이 채널 사용에 동의하지 않으면 펠토 AP는 추가적인 무선 채널을 사용할 수 없다. [9]는 펠토관리서버 (Femto management server)가 그래프 컬러링 알고리즘 (Graph coloring algorithm)을 이용하여 펠토 AP에게 공평하게 무선채널을 할당한 후, 주변 펠토 AP 들이 사용하지 않는 무선채널을 추가로 할당받게 된다. 하지만, [9]에서 제안하는 방법은 일부 펠토 AP들이 추가로 채널을 사용하게 됨에 따라, 펠토 AP들 사이의 간섭도 증가하게 된다.

본 연구에서는 펠토 AP 밀도가 높은 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) 기반 기업형 펠토망 환경에서 하향링크 성능향상을 위한 그래프 컬러링 기반 동적채널할당 (Graph Coloring based DCA: GC-DCA) 방법을 연구한다. 제안하는 GC-DCA는 그래프 컬러링을 이용한 펠토 AP 그룹화 단계와 펠토 UE 의 신호 대 잡음비 (Signal to Interference plus Noise Ratio: SINR)를 고려한 동적 채널할당 단계로 구성된다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 GC-DCA 의 평균 펠토 UE 전송률과 펠토 UE 가 요구하는 전송률을 만족하지 못하는 펠토 UE의 확률을 분석한 후, 제안하는 GC-DCA 가 다른 채널할당 방법들 보다 우수함을 보인다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 시스템 모델을 소개하고, 3장에서 GC-DCA 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 시스템 성능을 분석한 후, 마지막으로 5장에서 결론을 맺고 향후 연구방향을 알아본다.

II. 시스템 모델

본 연구에서는 매크로셀과 펠토셀이 공존하는 OFDMA 시스템 환경에서 하향링크 성능을 분석한다. 그림 1 은 매크로셀 토폴로지와 빌딩 내 기업형 펠토망 토폴로지를 나타낸다. 매크로셀 네트워크는 그림 1-(a)와 같이 3 섹터 지향성 안테나를 이용하는 $|S|$ 개 ($S = \{1, 2, \dots, S\}$)의 매크로 BS 로 구성된다. 매크로 BS 는 $|K|$ 개 ($K = \{1, 2, \dots, K\}$)의 부채널 수를 갖으며, 각 섹터는 $|K|/3$ 개의 서로 다른 부채널 그룹

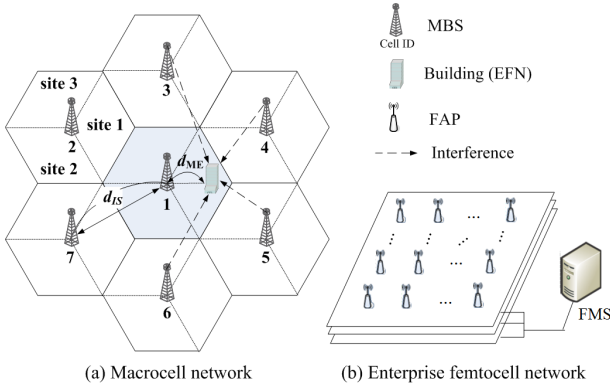


그림 1. 매크로셀과 기업형 펌토망 토폴로지.
Fig. 1. System topology of macrocell and enterprise femtocell networks

을 이용함으로써 이웃한 매크로셀과의 간섭을 완화한다. 시스템 성능분석은 매크로셀 토폴로지의 중앙에 있는 1번 셀의 섹터 1 (site 1) 커버리지 내에 위치한 기업형 펌토망을 목표로 한다. d_{IS} 와 d_{ME} 는 각각 서로 이웃한 매크로 BS 사이의 거리(Intersite distance) 그리고 매크로 BS 와 기업형 펌토망이 위치한 빌딩 사이의 거리를 나타낸다. 그림 1-(b)의 기업형 펌토망에는 $|\mathbf{V}|$ 개($\mathbf{V} = \{1, 2, \dots, N\}$)의 펌토 AP 가 빌딩의 각 층에 정방형 모델로 배치되며, 빌딩 내의 전체 펌토 AP 는 건물 내부(또는 외부)에 위치한 펌토관리 서버가 관리한다. 각 펌토 AP는 $|\mathbf{M}|$ 개($\mathbf{M} = \{1, 2, \dots, M\}$)의 펌토 UE 에게 서비스를 제공하며, 펌토 UE는 이동하지 않는다. 매크로 BS와 가까운 거리에 위치한 기업형 펌토망은 매크로 BS로부터 받는 간섭영향이 크기 때문에, 펌토관리서버는 기업형 펌토망이 위치한 매크로셀 섹터에서 사용하지 않는 2개의 부채널 그룹 \mathbf{K}_{EFN} ($|\mathbf{K}_{EFN}|=2|\mathbf{K}|/3$)를 펌토 AP 들에게 주파수 재사용과 함께 할당한다. 그리고, 지향성 안테나의 특성에 따라 가장 근접한 4개의 매크로 BS에서 펌토 AP들과 동일한 부채널 그룹을 사용하는 2개의 매크로 BS로부터 간섭영향을 받게 된다. 펌토 AP는 전방향 안테나를 사용하며, 같은 층에 위치한 펌토 AP 사이의 간섭은 존재하지만 서로 다른 층 사이의 펌토 AP 간섭은 낮은 펌토셀 송신파워와 층과 층 사이에 존재하는 벽에 의한 신호감쇄로 존재하지 않음을 가정한다. 또한, 펌토 UE 는 정확한 신호세기 측정이 가능하며, 짧은 시간동안에 급변하는 Short-term 페이딩은 실험의 간편화를 위해 무시한다.

펌토 AP n ($n \in \mathbf{V}$)이 부채널 k ($k \in \mathbf{K}$)를 이용하여 펌토 UE m ($m \in \mathbf{M}$)에게 데이터를 전송할 때, SINR 과 부채널 당 전송률

(bps/subchannel) 은 γ_{nmk} 와 r_{nmk} 로 표현하며, 식 (1)~(7)을 이용하여 계산된다. 펌토 UE m 이 부채널 k 를 이용하여 펌토 AP n 으로부터 수신한 신호의 세기, R_{nmk}^{FAP} , 는 식 (1)과 같다.

$$R_{nmk}^{FAP} = P_T^{FAP} \beta \left(\frac{d_0}{d_{nm}} \right)^\alpha, \quad (1)$$

식 (1)에서 P_T^{FAP} 와 β 는 각각 펌토 AP 의 송신 전력 세기와 안테나 특성에 따른 상수로 $\beta = 20 \log_{10}((q/f_c)/(4\pi d_0))$ dB 와 같이 표현된다. 여기에서, q , f_c , 그리고 α 는 각각 빛의 속도 (Speed of light), 반송 주파수 (Carrier frequency), 그리고 거리손실 지수 (Path loss exponent)를 나타낸다. 또한, d_{nm} 은 펌토 AP n 과 펌토 UE m 사이의 거리 (m)를 나타내고, d_0 는 참조거리 (Reference distance) 를 의미하며 실내 환경에서는 $d_0 = 1\text{m}$ 를 사용한다. 식 (2)는 펌토 UE m 이 부채널 k 를 이용할 때 매크로 BS s 로부터 받는 간섭신호의 세기, R_{smk}^{MBS} , 를 나타낸다.

$$R_{smk}^{MBS} = P_T^{MBS} \beta L_W P_G(\theta) \left(\frac{d_0}{d_{sm}} \right)^\alpha, \quad (2)$$

식 (2)에서 P_T^{MBS} 는 매크로 BS 의 송신전력 세기이며, d_{sm} 은 매크로 BS s ($s \in \mathbf{S}$)와 FUE m 사이의 거리를 나타낸다. $d_0 = 5\text{m}$ 이고 L_W 은 실내/외 사이의 벽에 의한 신호감쇄를 나타내며 식 (3)과 같이 표현된다¹⁰⁾.

$$L_W = p_1 f_c^2 + p_2 f_c + p_3, \quad (3)$$

식 (3)에서 p_1 와 p_2 는 각각 -1.8 와 10.6 이다. 또한, $p_3 = 5.8\eta - 5.5$ 로 계산되며, η 는 벽의 수를 나타내고 실험에서 $\eta = 1$ 이다. 식 (2)에서 $P_G(\theta)$ 는 지향성 안테나에 의한 이득(Gain)을 나타내며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$P_G(\theta) = g_{std} - \min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right), g_m \right] \text{dBi}, \quad (4)$$

식 (4)에서 θ 의 범위는 $-180^\circ < \theta < 180^\circ$ 이며, $\theta_{3dB} = 120^\circ$ 이다. g_{std} 와 g_m 은 각각 14dBi 와

20dB 이다^[11].

식 (1)~(4)을 이용하여 γ_{nmk} 를 식 (5)와 같이 계산한다.

$$\gamma_{nmk} = \frac{R_{nmk}^{FAP}}{\sigma_N^2 + \sum_{\forall s \in \mathbf{I}_z^{MBS}} R_{smk}^{MBS} + \sum_{\substack{\forall i \in \mathbf{I}_z^{FAP} \\ i \neq n}} R_{imk}^{FAP}}, \quad n \in \mathbf{I}_z^{FAP}, \forall n, m, k, \quad (5)$$

식 (5)에서 σ_N^2 와 \mathbf{I}_z^{FAP} 은 백색 잡음 (White noise) 과 동일한 채널을 사용하는 펠토 AP 그룹 z ($\mathbf{I}_z^{FAP} \subseteq \mathbf{V}$)을 각각 나타낸다. \mathbf{I}_z^{FAP} 는 3.1절에서 그래프 컬러링 알고리즘을 이용하여 구성되며, \mathbf{I}_z^{MBS} 는 간섭을 주는 매크로 BS의 집합을 나타낸다.

식 (5)에서 계산된 γ_{nmk} 는 펠토 AP m 으로부터 부채널 k 를 이용하여 서비스 받는 펠토 UE n 의 주파수 효율(Spectral efficiency, bits/Hz/s)인 δ_{nmk} 를 식 (6)에서 계산한다.

$$\delta_{nmk} = \log_2 \left(1 + \frac{-1.5\gamma_{nmk}}{\ln(5P_e)} \right), \quad (6)$$

식 (6)에서 P_e 는 목표하는 Bit error rate 이며, 실험에서는 10^{-3} 으로 한다^[12]. 최종적으로 δ_{nmk} 는 식 (7)을 이용하여 r_{nmk} 을 계산한다.

$$r_{nmk} = \begin{cases} W\delta_{\max} & \text{if } \delta_{nmk} \geq \delta_{\max} \\ W\delta_{nmk} & \text{if } \delta_{\max} > \delta_{nmk} > \delta_{\min} \\ W\delta_{\min} & \text{if } \delta_{\min} \geq \delta_{nmk} \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 W 는 각 부채널의 대역폭 (Bandwidth/subchannel, Hz)을 나타내며, $\delta_{\min} = 0$ 와 $\delta_{\max} = 4.4$ 는 각각 최대와 최소 주파수 효율을 나타낸다.

식 (7)의 r_{nmk} 를 이용하여 펠토 AP n 이 서비스하는 펠토 UE m 의 전송률 (Bits per second: bps), C_{nm} ,을 식 (8)에서 계산한다.

$$C_{nm} = \sum_{\forall k \in \mathbf{K}} \omega_{nmk} r_{nmk}, \quad \forall n, m, \quad (8)$$

식 (8)에서 ω_{nmk} 는 채널할당의 Indicator 로 사용된다. 즉, $\omega_{nmk} = 1$ 은 펠토 AP n 이 부채널 k 를 이용하여 펠토 UE m 에게 데이터를 전송함을 의미하며, $\omega_{nmk} = 0$ 은 반대의 경우이다. 또한, 본 연구에서는 각 펠토 UE 가 요구하는 트래픽 전송률 ρ (bps) 를 만족하지 못한 펠토 UE 의 확률 P_{un} 을 식 (9)를 이용하여 계산한다.

$$P_{un} \approx \frac{\zeta}{NM}, \quad (9)$$

식 (9)에서 ζ 는 전송률이 ρ 보다 낮은 펠토 UE 의 수를 나타낸다.

III. 제안하는 그래프 컬러링 알고리즘 기반 동적채널할당 방법

본 장에서는 제안하는 GC-DCA는 그래프 컬러링 알고리즘 기반 펠토 AP 그룹화 단계와 펠토 UE의 SINR을 고려한 동적채널할당 단계로 구성된다. 먼저, 펠토 AP 그룹화 단계에서는 펠토 UE와 펠토 AP 사이의 간섭 행렬 (Interference matrix)을 생성한 후, 그래프 컬러링 알고리즘을 이용하여 서로 간섭이 적은 펠토 AP 들을 그룹화 한다. 두 번째 단계에서는 기업형 펠토망의 시스템 성능향상을 위한 동적채널할당 방법을 제안한다.

3.1. 그래프 컬러링 알고리즘을 이용한 펠토 AP 그룹화 단계

펠토관리서버가 기업형 펠토망의 펠토 AP에게 간섭을 고려하며 무선 채널을 할당하는 문제는 NP-hard 이며, 본 연구에서는 그래프 컬러링 알고리즘을 이용하여 간섭 그래프 (Interferen graph)를 생성함으로써 문제를 해결한다. 이를 위해, 펠토 UE 와 펠토 AP 사이의 간섭영향을 나타내는 간섭행렬 $\mathbf{H} = [h_{xy}]_{N \times N}$, ($1 \leq x \leq N, 1 \leq y \leq N$)을 생성한다. $h_{xy} = 1$ 은 펠토 AP x 와 y 가 서로 높은 간섭영향이, $h_{xy} = 0$ 는 낮은 간섭영향이 있음을 나타낸다. 간섭행렬 \mathbf{H} 를 생성하기 위해 먼저 2진 행렬 (Binary matrix) $\mathbf{A}_n = [a_{jm}]_{N \times M}$, ($1 \leq j \leq N, 1 \leq m \leq M$)를 생성한다. a_{jm} 은 펠토 AP j 와 펠토 UE m 사이에 큰 간섭영향의 유무를 표현하기 위해 사용하며, 식 (10)과 같이 표현된다.

$$a_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 < \frac{R_{nmk}}{\sum_{\forall s \in \mathbf{I}_z^{MBS}} R_{smk}^{MBS} + R_{jmk}} < \Gamma_{th} \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)에서 Γ_{th} 는 간섭세기에 대한 경계값 (Threshold)을 나타낸다. 이후, 펠토 AP n 은 식 (11)을 이용하여 2진 행렬 $\mathbf{B}_n = [b_j]_{1 \times N}$, ($1 \leq j \leq N$)를 \mathbf{A}_n 으로부터 변형하여 생성한다.

$$b_j = a_{j1} \vee a_{j2} \vee \dots \vee a_{jM}, \quad (11)$$

식 (11)에서 \vee 는 논리적 OR 연산 (Logical OR operator)을 나타낸다. 이후, 펠토관리서버는 식 (12)를 이용하여 \mathbf{H} 를 \mathbf{B}_n 으로부터 변형하여 생성한다.

$$\mathbf{H} = [\mathbf{B}_1^T, \mathbf{B}_2^T, \dots, \mathbf{B}_n^T, \dots, \mathbf{B}_N^T]. \quad (12)$$

식 (12)로부터 생성한 \mathbf{H} 를 기반으로 간섭그래프 $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ 를 생성한다. \mathbf{V} 와 \mathbf{E} 는 각각 Vertex 집합과 Edge 집합을 나타낸다. 펠토관리서버는 그래프 컬러링 알고리즘을 이용하여 펠토 AP에게 색을 할당 (Coloring)하며, 펠토 AP 를 그룹화 한다. 모든 펠토 AP 에게 각 1개의 색을 할당하면, 펠토관리서버는 최소 컬러수 $\psi = |\mathbf{Z}|$, $\mathbf{Z} = \{1, 2, \dots, \mathbf{Z}\}$, 를 얻게 된다, 또한, 동일한 색으로 구성된 펠토 AP 그룹은 서로 간섭을 주며, 식 (5)에서 사용하는 \mathbf{I}_z^{FAP} ($z \in \mathbf{Z}$)으로 이용된다. 그래프 컬러링 알고리즘은 DSATUR (Degree of Saturation) 알고리즘을 이용한다^[13].

3.2. 그래프 컬러링 알고리즘 기반의 동적채널할당 단계

본 절에서는 3.1절에서 얻은 간섭그래프를 이용하여 부채널을 할당하는 동적채널할당 방법을 제안한다. 부채널의 효율을 높이기 위해 먼저 펠토 AP n 의 펠토 UE 중에서 부채널 k 에 대해서 가장 전송률이 높은 펠토 UE m_n^* 을 식 (13)을 이용하여 얻는다.

$$m_n^* = \arg \max_m (r_{nmk}^{FAP}), m \in \mathbf{M}, \forall n. \quad (13)$$

이 후, 그래프 컬러링 알고리즘을 이용하여 얻어진

ψ 개의 펠토 AP 그룹에서 가장 전송률이 높은 펠토 AP 그룹 z^* 을 식 (14)를 이용하여 얻는다.

$$z^* = \arg \max_z \left(\sum_{\forall j \in \mathbf{I}_z^{FAP}} r_{jm_j^*k}^{FAP} \right), z \in \mathbf{Z}. \quad (14)$$

마지막으로 알고리즘 1 을 이용하여 $2K/3$ 개의 부채널을 유동적으로 펠토 AP 와 펠토 UE 에게 할당한다.

알고리즘 1: 유동적 부채널 할당 방법

1 : **Inputs:** $\mathbf{Z}, \mathbf{V}, \mathbf{M}, \mathbf{K}, r_{nmk}^{FAP}, \mathbf{I}_z^{FAP}, \forall n, m, k, z.$

2 : **Outputs:** $\omega_{nmk}.$

3 : **Initialization:** $C_{nm} = 0.$

4 : **for** $k=1$ to \mathbf{K} **do**

5 : **if** $k \in \mathbf{K}_{EFN}$ **then**

6 : Find m_n^* according to (13);

7 : Find z^* according to (14);

8 : $\omega_{nm_n^*k} = 1, \forall n \in \mathbf{I}_{z^*}^{FAP};$

9 : $C_{nm_n^*k} = C_{nm_n^*k} + r_{nm_n^*k}^{FAP} \omega_{nm_n^*k},$
 $\forall n \in \mathbf{I}_{z^*}^{FAP};$

10 : **if** $C_{nm_n^*k} > \rho$ **then**

11 : $\mathbf{M}_n \leftarrow \mathbf{M}_n - \{m_n^*\};$

12 : **if** $\mathbf{M}_n = \emptyset$ **then**

13 : $\mathbf{I}_{z^*}^{FAP} \leftarrow \mathbf{I}_{z^*}^{FAP} - \{n\};$

14 : **end if**

15 : **end if**

16 : **end if**

17 : **end for**

11-12 줄에서 \mathbf{M}_n 은 펠토 AP n 이 서비스 중인 펠토 UE 집합을 나타낸다.

IV. 성능 평가

제안하는 GC-DCA의 평균 펠토 UE 전송률 $\overline{C_{FUE}}$ 과 P_{un} 을 분석하며, 주파수 재사용 계수를 1 로 사용하는 주파수 재사용률 1 (Frequency reuse 1) 방법, 그리고 $|\mathbf{K}_{EFN}|/\psi$ 의 고정된 부채널 수를 펠토 AP에게 할당하는 그래프 컬러링 기반 정적채널 할당 (Graph Coloring based SCA: GC-SCA) 방법과 비교한다. 성능분석은 $0.2 \leq \rho \leq 2.4$ Mbps 의 범위에서 각 300 회의 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행

한다. 기업형 펠토망을 구성하는 빌딩은 50m × 50m 의 면적을 갖으며, 각 층의 높이는 3m 이다. 펠토 AP와 펠토 UE 이 높이는 각각 1.5m 와 1m 이다. d_{IS} 와 d_{MB} 는 각각 1 km 와 250 m 이다. 매크로 BS의 거리손실 파라미터 $\alpha=3.7$, 그리고 펠토 AP의 거리손실 파라미터 $\alpha=1.6, 2.5$, 그리고 3.5 을 사용한다¹⁴⁾. 이때, $\alpha=1.6$ 는 개방된 실내환경을, $\alpha=3.5$ 는 장애물이 많은 실내환경을 의미한다. 매크로 셀과 기업형 펠토망에서 Shadow 페이딩의 표준편차는 각각 8dB 와 4dB이며, 평균은 0 이다. 실험에 사용한 주요 파라미터는 표 1 에 나타낸다¹⁵⁾.

그림 2는 그래프 컬러링 알고리즘을 이용하여 생성한 펠토 AP 그룹을 나타낸다. 다양한 기호 ‘△’, ‘▷’, ‘□’, ‘○’ 는 서로 다른 펠토 AP 그룹을 나타내며, ‘x’ 기호는 펠토 UE 를 의미한다. 동일한 펠토 AP 그룹에 포함된 펠토 AP들은 서로 간섭영향을 받으며, 그림 2 는 중앙에 위치한 펠토 UE 가 동일한 펠토 AP 그룹에 포함된 펠토 AP 들로부터 간섭영향을 받는 예를 나타낸다.

표 1. 시스템 파라미터.

Table 1. System parameters.

Parameter	Value
Carrier frequency (f_c)	2 GHz
Bandwidth for a subchannel	5 kHz
The number of subchannels	900
The number of femto APs/floor	25 (5 × 5 Grid model)
The number of femto UE/femto AP	1
Tx power of femto AP(P_T^{FAP})	20 dBm
Tx power of macro BS(P_T^{MBS})	43 dBm
σ_N^2	-174 dBm/Hz

그림 3은 적합한 Γ_{th} 를 결정하기 위해 $\alpha = 2.5$ 와 $\rho = 1.4$ Mbps 를 이용한 하나의 예를 나타낸다. 제안하는 GC-DCA는 GC-SCA 보다 높은 $\overline{C_{FUE}}$ 를 보이면서, P_{un} 에서도 좋은 성능을 보인다. $\alpha = 2.5$ 일 때는 $\Gamma_{th} = 30$ 에서 가장 좋은 성능을 보이기 때문에, 이후 실험을 위한 파라미터로 사용한다. 표 2 는 그림 2와 같은 방법으로 얻은 α 가 1.6 과 3.5 일 때의 Γ_{th} , 그리고 결정된 Γ_{th} 에 따른 평균 채널그룹 수, $\overline{\psi}$,를 나타낸다.

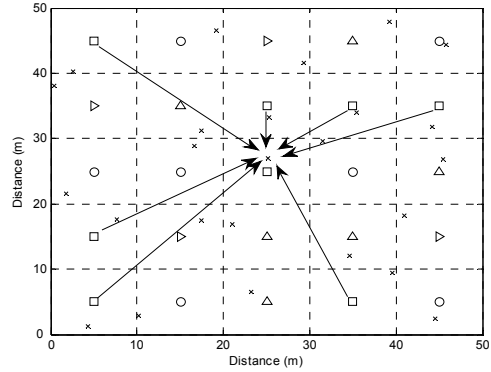


그림 2. 그래프 컬러링 이용하여 생성한 펠토 UE 그룹의 예.

Fig. 2. An example of system topology with graph coloring.

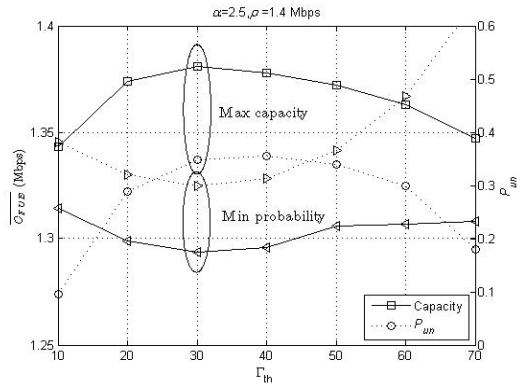


그림 3. 평균 펠토 UE 전송률 ($\overline{C_{FUE}}$) 와 P_{un} vs. Γ_{th} .

Fig. 3. Mean femto UE capacity ($\overline{C_{FUE}}$) and P_{un} vs. Γ_{th} .

표 2. α 에 따른 시스템 파라미터 Γ_{th} 와 $\overline{\psi}$.

α	1.6	2.5	3.5
Γ_{th}	20	30	60
$\overline{\psi}$	11.6	6.1	4.9

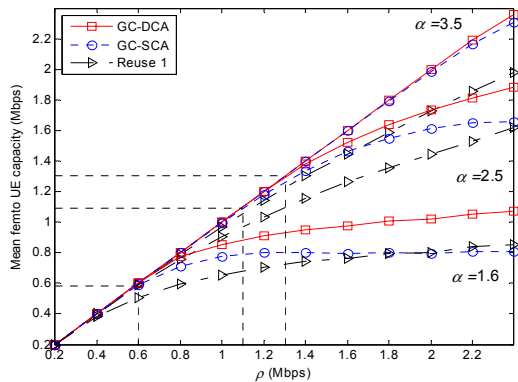


그림 4. 평균 펠토 UE 전송률 ($\overline{C_{FUE}}$) vs. ρ .

Fig. 4. Mean femto UE capacity ($\overline{C_{FUE}}$) vs. ρ .

그림 4 는 ρ 에 따른 $\overline{C_{FUE}}$ 에 대한 분석결과를 나타낸다. GC-DCA와 주파수 재사용률 1 방법은 ρ 가 증가함에 따라 계속 증가하는 반면, GC-SCA 는 펌토 AP 에게 할당된 부채널 수에 따라 0.8 Mbps ($\alpha = 1.6$) 와 1.65 Mbps ($\alpha = 2.5$)에서 포화상태 (Saturation) 된다. $\alpha = 3.5$ 은 펌토 AP가 간섭영향이 낮아서 GC-SCA와 GC-DCA 의 성능이 거의 비슷한 결과를 보인다. 결과적으로 α 의 변화에 따라 펌토 AP 사이의 간섭영향이 다르기 때문에 $\overline{C_{FUE}}$ 가 다른 결과를 보이지만, 제안하는 GC-DCA가 다른 방법들 보다 우수한 성능을 보인다.

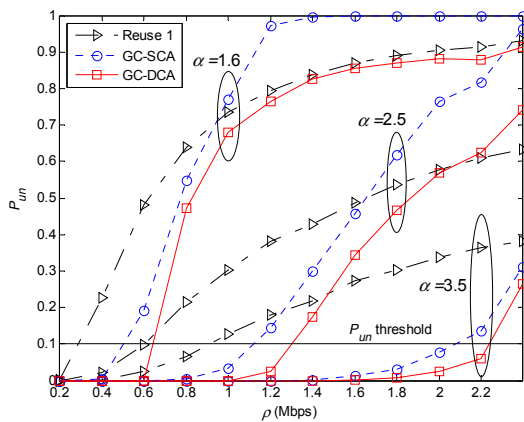


그림 5. P_{un} vs. ρ .
Fig. 5. P_{un} vs. ρ .

그림 5 는 ρ 에 따른 P_{un} 에 대한 분석결과를 나타낸다. 주파수 재사용률 1 은 α 와 관계없이 상대적으로 완만하게 증가하는 반면, GC-SCA와 GC-DCA 는 급격히 증가한다. $\alpha = 1.6$ 일 때, GC-DCA가 다른 방법들 보다 항상 좋은 성능을 보인다. 하지만, α 가 2.5 와 3.5 일 때, GC-SCA와 GC-DCA는 ρ 가 낮은 경우에 주파수 재사용률 1 보다 성능이 좋지만, ρ 가 증가하면서 성능이 나빠진다. P_{un} 의 분석결과는 그림 4의 $\overline{C_{FUE}}$ 와 함께 성능을 분석할 수 있다. 즉, P_{un} 의 경계값(Threshold)을 설정하면, 서비스 가능한 ρ 의 값을 알 수 있으며, 이 때 ρ 는 그림 5 에서 펌토 UE의 최대 $\overline{C_{FUE}}$ 값을 나타낸다. 예를 들어, $\alpha = 2.5$ 에서 P_{un} 경계값을 0.1 로 한다면, 주파수 재사용률 1, GC-SCA, 그리고 GC-DCA 의 서비스 가능한 ρ 는 각각 0.6, 1.1, 그리고 1.3 Mbps 이고, $\overline{C_{FUE}}$ 는 각각 약 0.58, 1.08, 그리고 1.3 Mbps 가 된다.

V. 결론

본 연구에서는 기업형 펌토망 환경에서 그래프 컬러링 알고리즘을 이용한 효율적 부채널 할당 방법인 GC-DCA를 제안하고 성능을 분석하였다. 파라미터 α 와 ρ 를 다양하게 변화시키는 환경에서 GC-DCA 는 다른 채널할당 방법들 보다 $\overline{C_{FUE}}$ 와 P_{un} 측면에서 우수한 성능을 보였다. 특히, 성능분석을 통해 α 에 따라 기업형 펌토망에서 펌토 UE 가 제공받을 수 있는 최대 성능을 제시하였으며, 향후 기업형 펌토망을 도입할 때 참고할 수 있는 자료가 될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 펌토 AP 사이의 간섭을 주로 고려하였지만, 기업형 펌토망은 매크로 BS 와의 거리에 따라 간섭영향이 다를 수 있다. 또한, 그림 5에서 α 와 ρ 의 변화에 따라 P_{un} 이 급격히 증가하는 특성을 볼 수 있었다. 따라서, 향후 연구로는 매크로셀과 기업형 펌토망 사이의 간섭을 고려한 동적채널할당 방법과 펌토 UE 의 공평성(Fairness)를 고려하여 P_{un} 의 급격한 증가를 경감시킬 수 있는 동적채널할당 방법을 연구할 계획이다.

References

- [1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sep. 2008.
- [2] K. H. Jang and K. H. Kim, "Femto-cell: standard trend and technology issue," *KICS Inform, Commun. Mag.*, vol. 26, no. 11, pp. 15-21, Oct. 2009.
- [3] D. Lopez-Perez, A. Valcarce, G. de la Roche, and J. Zhang, "OFDMA femtocells: a roadmap on interference avoidance," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no 9, pp. 41-48, Sep. 2009.
- [4] H.-C. Lee, D.-C. Oh, and Y.-H. Lee, "Mitigation of inter-femtocell interference with adaptive fractional frequency reuse," in *Proc. IEEE ICC 2010*, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [5] M. Z. Chowdhury, Y. M. Jang, and Z. J. Haas, "Cost-effective frequency planning for

capacity enhancement of femtocellular networks,” *Wireless Personal Commun.*, vol. 60, no.1, pp. 83-104, Sep. 2011.

[6] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, and D. I. Kim, “Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches”, *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 86-95, 2012.

[7] C.-Y. Oh, M. Y. Chung, H. Choo, and T.-J. Lee, “Resource allocation with partitioning criterion for macro-femto overlay cellular networks with Fractional frequency reuse,” *Wireless Personal Commun.*, vol. 68, no. 2, pp. 417-432, Jan. 2013.

[8] K. Zheng, F. Hu, L. Lei, and W. Wang, “Interference coordination between femtocells in LTE-Advanced networks with carrier aggregation,” in *Proc. Chinacom 2010*, pp. 1-5, Beijing, China, Aug. 2010.

[9] S. Uygungelen, G. Auer, and Z. Bharucha, “Graph-based dynamic frequency reuse in femtocell networks,” in *Proc. IEEE VTC 2011-Spring*, pp. 1-6, Budapest, Hungary, May 2011.

[10] A. Valcarce and J. Zhang, “Empirical indoor-to-outdoor propagation model for residential areas at 0.9 - 3.5 GHz,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 682-685, 2010.

[11] IEEE, “*Multi-hop Relay System Evaluation methodology (Channel Model and Performance Metric)*,” IEEE 802.12j-06/013r3, Feb. 2007.

[12] X. Qiu and K. Chawla, “On the performance of adaptive modulation in cellular systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 6, pp. 884-895, June 1999.

[13] D. Brelaz, “New methods to color the vertices of a graph”, *Commun. Assoc. Comput. Machinery (ACM)*, vol. 22, pp. 251-256, Apr. 1979.

[14] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.

[15] 3GPP, “Simulation assumptions and parameters for FDD HeNB RF requirements,”

3GPP TSG-RAN WG 4, R4-092042, May 2009.

김 세 진 (Se-Jin Kim)



2004년 2월 조선대학교 전자계산학과 졸업
 2006년 2월 고려대학교 전산학과 석사
 2010년 8월 고려대학교 전산학과 이학박사
 2010~2011년 고려대학교 자연과학연구소 연구교수

2011~2012년 University of Washington 전자공학과 Post Doctor

2012~현재 University of British Columbia, 전자컴퓨터공학과 Post Doctor

<관심분야> 무선 자원관리 및 간섭제어, Power saving, Multihop relay, Femtocell

조 일 권 (IlKwon Cho)



1996년 한양대학교 전자공학과 졸업
 1998년 한양대학교 전자공학과 석사
 1998년 큐슈대학교 정보공학공학박사
 정보통신기술사, 정보시스템감

리사

1998~2001년 LG전선 통신연구소 주임연구원

2001~2003년 (주)링네트, (주)포위즈 선임연구원

2003~현재 한국정보화진흥원 책임연구원, KOREN 팀장

<관심분야> SDN, Mobility, Femtocell, Qos 등

김 이 강 (Yi-Kang Kim)



2008년 2월 고려대학교 전산학과 졸업

2010년 2월 고려대학교 전산학과 석사

2010년 3월~현재 고려대학교 전산학과 박사과정

<관심분야> 통신망 설계 및 성능분석, 이중망간 간섭 제어, D2D

조 충 호 (Choong-Ho Cho)



1981년 2월 고려대학교 산업
공학과 졸업

1983년 2월 고려대학교 산업
공학과 석사

1986년 프랑스 INSA de Lyon
전산학과 석사

1989년 프랑스 INSA de Lyon

전산학과 박사

1990~1994년 순천향대학교 전산통계학과 조교수

1994~현재 고려대학교 전산학과 교수

<관심분야> 통신망 트래픽 관리기술, 무선통신 시
스템, 멀티미디어통신, 인터넷 비즈니스