

논문 2014-51-6-2

이종 네트워크 하향링크의 셀간 간섭 조정 및 사용자 스케줄링을 위한 저복잡도 알고리즘

(A Low-Complexity Algorithm for Inter-Cell Interference Coordination and User Scheduling in Downlink Heterogeneous Networks)

박진현*, 이재홍**

(Jinhyun Park[©] and Jae Hong Lee)

요약

이종 네트워크(HetNet)란 매크로셀 내에 소형셀이 혼재한 네트워크이다. 이종 네트워크에서는 대형셀로부터 소형셀 사용자에게 미치는 간섭이 소형셀 사용자의 성능을 열화시키는 주 원인 중 하나이며, 이 간섭을 줄이기 위해 향상된 셀간 간섭 조정 기법(eICIC)이 필요하다. 기존의 eICIC 관련 연구에서는 프레임별 채널 변화를 거의 고려하지 않고 네트워크의 장기 처리율을 최대화하는 데 치중되어 성능 향상이 제한적이었다. 이 논문에서는 네트워크 전체 효율을 최대화하기 위해 매 프레임마다 동적으로 셀간 간섭을 제어하고 사용자를 스케줄링하며, 전수검색보다 계산 복잡도가 낮은 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘이 기존 알고리즘보다 네트워크 전체 처리율을 향상시키며, 사용자의 수가 많을 때 사용자간 공평성을 향상시키는 컴퓨터 모의실험을 통해 보인다.

Abstract

Heterogeneous network (HetNet) is a network consisting of macrocells overlaid with small cells. In HetNet, the interference from macrocell to small cell users is a major cause of performance degradation of small cell users and enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) is needed to mitigate the interference. Previous works on eICIC gives limited performance gain because these works focus on maximizing long-term throughput and rarely consider varying channel conditions over frames. This paper proposes a new algorithm which dynamically coordinates interference and schedules users on each frame to maximize the total utility of the network with lower computational complexity than exhaustive search. Simulation results show that the proposed algorithm achieves higher total throughput than the throughput with the conventional algorithm, and has higher fairness index than the conventional algorithm when there large number of users.

Keywords : HetNet, eICIC, interference coordination, almost blank subframe (ABS), scheduling

* 학생회원, ** 정회원, 서울대학교 전기정보공학부
뉴미디어통신공동연구소
(Department of Electrical and Computer
Engineering, INMC, Seoul National University)

© Corresponding Author(E-mail: jinhyunpark@snu.ac.kr)

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로
한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 2009-0083495, 2011-0017437).

접수일자: 2013년12월21일, 수정일자: 2014년04월23일
수정완료: 2014년05월27일

I. 서론

이동통신 네트워크에서 갈수록 증가하는 데이터 요구량을 만족시키기 위해, 매크로셀(macrocell)로 구성된 기존 네트워크에 피코셀(picocell), 펌토셀(femtocell)등의 소형셀을 추가하여 네트워크 용량을 증대시키는 방

법이 활발히 논의되고 있다. 이와 같은 네트워크를 이종 네트워크(heterogeneous network) 라고 명명한다. 이종 네트워크에서 매크로셀과 소형셀은 일반적으로 동일한 주파수 대역을 사용하며, 소형셀은 매크로셀보다 훨씬 적은 전송 전력을 사용한다. 따라서 셀 경계(cell edge)에 위치한 소형셀 사용자는 매크로셀 기지국(macrocell base station: MBS)으로부터 큰 간섭을 받게 된다.

이러한 간섭을 줄이기 위해 3GPP에서는 셀간 간섭 조정 기법(enhanced inter-cell interference coordination: eICIC)을 소개하였다^[1]. eICIC에서는 매크로셀 기지국이 프레임 내의 특정 서브프레임(subframe)에서 데이터를 전송하지 않도록 하여 해당 서브프레임에서 소형셀 사용자가 매크로셀 기지국으로부터 받는 간섭의 크기를 줄인다. 이러한 서브프레임을 ABS(almost blank subframe) 라고 명명한다.

기존의 eICIC 관련 연구에서는 네트워크의 장기 처리율(long-term throughput)을 향상시키기 위한 ABS 할당을 주로 다루었다^[2-3]. 이들 연구에서는 ABS 할당 시 실제 이동통신 환경에 존재하는 프레임별 채널 변화 및 사용자 스케줄링이 거의 고려되지 않았으며, 따라서 이들 연구에서 제안했던 기법을 통한 성능 향상에는 한계가 있다.

본 논문에서는 이종 네트워크에서 채널 상태 정보를 제한적으로 아는 경우, 매 프레임마다 동적으로 ABS를 할당하며 셀 사용자를 스케줄링하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 매 프레임별로 네트워크 전체 효율을 최대화시키기 위한 최적 ABS 및 각 서브프레임에 스케줄링할 사용자를 선택한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델을 설정한다. III장에서는 사용자가 기지국으로부터 수신한 신호의 평균 블록 오류율을 유도하고 IV장에서는 ABS 할당 및 사용자 스케줄링 알고리즘을 제안한다. V장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해서 확인한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 M 개의 매크로셀과 N 개의 피코셀이 혼재하는 하향링크(downlink) 이종 네트워크를 고려한

다. 매크로셀과 피코셀 중앙에는 매크로 기지국과 피코 기지국(pico base station: PBS)이 각각 존재한다. 매크로셀 $m, m = 1, \dots, M$, 에 속한 사용자의 집합을 K_m^M 으로 명명하고, 피코셀 $n, n = 1, \dots, N$, 에 속한 사용자의 집합을 K_n^P 으로 명명한다.

모든 기지국은 서로 연결된 유선 백홀(backhaul)을 통해 동기가 맞추어져 있으며, 서로 통신할 수 있다고 가정한다. 모든 셀은 동일한 주파수 대역을 사용하는 것으로, 즉 네트워크의 주파수 재사용률이 1인 것으로 가정한다. 그리고 모든 셀의 스케줄링과 ABS 할당을 관장하는 중앙 제어장치(central controller)가 있다고 가정한다.

각 기지국의 프레임은 L 개의 서브프레임으로 나뉜다. 중앙 제어장치는 셀간 간섭과 각 셀의 처리율을 고려하여 각 매크로셀의 ABS를 할당한다. 이 때, 각 매크로셀에 할당된 ABS의 수 및 위치는 다를 수 있다. 그리고 피코셀에는 ABS가 할당되지 않는다. 각 기지국은 ABS가 아닌 일반 서브프레임에서 자신의 사용자에게 데이터를 전송한다^[3].

한 서브프레임에서 매크로셀 m 의 ABS 할당을 가리키는 ABS 지시자를 β_m 으로 명명하며, 매크로셀 m 이 ABS이면 $\beta_m = 0$, 그렇지 않으면 $\beta_m = 1$ 이다. 한 서브프레임에서 모든 매크로셀의 ABS 할당을 가리키는 벡터를 ABS 지시자 벡터 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]^T$ 로 둔다. 서로 다른 ABS 지시자 벡터의 개수는 총 2^M 개이며, 이들 각각을 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{2^M}$ 으로 명명한다. 중앙 제어장치가 l 번째 서브프레임에 선택한 ABS 지시자 벡터의 인덱스를 $b_l = i, i = 1, 2, \dots, 2^M$, 으로 명명한다.

모든 채널은 한 프레임동안 일정하며, 매 프레임마다 독립적으로 변하는 레일리(Rayleigh) 블록 페이딩 채널이라고 가정한다^[4]. 이는 무선통신에서 흔히 사용하는 가정이다. 그러면 매크로 기지국 m 으로부터 임의의 사용자 $k \in \left(\bigcup_{m=1}^M K_m^M \right) \cup \left(\bigcup_{n=1}^N K_n^P \right)$ 로의 채널 계수 $h_{m,k}^M$ 은 평균 0, 분산 $(\sigma_{m,k}^M)^2$ 인 복소 가우시안 확률 변수이며 피코 기지국 n 으로부터 사용자 k 로의 채널 계수 $h_{n,k}^P$ 은 평균 0, 분산 $(\sigma_{n,k}^P)^2$ 인 복소 가우시안 확률 변수이다. 모든 기지국들은 채널 계수 $h_{m,k}^M, \forall k$, 및 $h_{n,k}^P, \forall k$, 에 대한 분포를 알고 있지만 이들에 대한 정확한 값은 모

른다고 가정한다.

매크로 기지국과 피코 기지국의 전송 전력은 각각 p^M 과 p^P 로 명명한다. 피코 기지국의 전송 전력은 매크로 기지국의 전송 전력보다 훨씬 작으므로, 피코 기지국이 사용자에게 미치는 간섭은 무시한다^[5]. 매크로셀의 ABS가 β_i 에 따라 할당되었을 때 사용자 $k \in K_m^M$ 의 수신 SINR은

$$\Gamma_{k,i} = \frac{p^M |h_{m,k}^M|^2}{\sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m}}^M \beta_{i,m'} p^M |h_{m',k}^M|^2 + N_0} \quad (1)$$

이며, 사용자 $k' \in K_n^P$ 의 수신 SINR은

$$\Gamma_{k',i} = \frac{p^P |h_{n,k'}^P|^2}{\sum_{m=1}^M \beta_{i,m} p^M |h_{m,k'}^M|^2 + N_0} \quad (2)$$

이다. 위 식에서 $\beta_{i,m}$ 은 벡터 β_i 의 m 번째 성분을 가리키며 N_0 는 AWGN의 분산을 가리킨다.

모든 2^M 개의 ABS 할당에 대한 수신 SINR을 측정하기 위한 오버헤드는 매우 크다. 따라서 한 프레임 동안, 사용자는 사전에 정해진 C 개의 ABS 할당에 대한 수신 SINR값만을 측정한 후 이 값을 자신이 속한 셀의 기지국으로 전송한다고 가정한다. 측정된 수신 SINR값에 대한 ABS 지시자 벡터를 β_1, \dots, β_C 라고 가정한다. 중앙 제어장치는 수신된 SINR값을 토대로 다음 프레임에 할당할 ABS와 스케줄할 사용자를 결정하며, 각 기지국은 스케줄된 사용자에게 전송할 데이터의 MCS (modulation and coding scheme)를 결정한다. 이 때 전송된 수신 SINR값의 양자화와 시간 지연에 따른 오류는 무시한다.

한 서브프레임에서 신호 전송을 위한 총 J 개의 MCS가 있다고 가정한다. j 번째 MCS, $j = 1, 2, \dots, J$,의 전송 효율(efficiency)은 η_j 로 명명한다. 기지국은 이들 MCS중 해당 서브프레임에서 스케줄된 사용자에서의 평균 블록 오류율(average block error rate)을 P_t 이하로 하는 MCS 중 하나를 선택하여 데이터를 사용자에게 전송하게 된다.

III. 평균 블록 오류율

이 장에서는 임의의 사용자 k 가 자신이 속한 셀의 기지국으로부터 수신한 신호의 평균 블록 오류율을 폐형으로 근사한다. 매크로셀의 ABS가 β_i 에 따라 할당되었을 때, 기지국으로부터 사용자 k 로 MCS j 로 전송된 신호의 수신 SINR이 γ 라면 이 때의 순시(instantaneous) 블록 오류율은 다음과 같이 근사된다^[6].

$$P_{k,i,j}(\gamma) \approx \begin{cases} 1, & \gamma \leq \theta_j, \\ 0, & \gamma > \theta_j. \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서 θ_j 는 MCS j 에 대한 문턱값을 가리킨다. 위 근사는 레일리 페이딩 채널에서 높은 정확도를 보이는 문턱 모델(threshold model)에 따른 근사이다^[6].

사용자 k 의 평균 블록 오류율은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{P}_{k,i,j} = \int_0^\infty P_{k,i,j}(\gamma) f_{\Gamma_{k,i}}(\gamma) d\gamma. \quad (4)$$

위 식에서 $f_{\Gamma_{k,i}}(\cdot)$ 는 $\Gamma_{k,i}$ 의 확률밀도함수를 가리킨다. (3)과 (4)로부터 평균 블록 오류율은 다음과 같이 얻어진다.

$$\bar{P}_{k,i,j} \approx \int_0^{\theta_j} f_{\Gamma_{k,i}}(\gamma) d\gamma = \Pr[\Gamma_{k,i} \leq \theta_j]. \quad (5)$$

$\Gamma_{k,i}$ 의 확률밀도함수를 구하기 위해, 우선 벡터 $\beta_i^{\text{fb}} = \arg \min_{\beta \in \{\beta_1, \dots, \beta_C\}} \|\beta_i - \beta\|$ 로 두고, 이 벡터의 m 번째 성분을 $\beta_{i,m}^{\text{fb}}$ 로 명명한다. 전체 매크로셀 기지국들은 다음의 4개 집합으로 분류된다.

$$M_{k,1} = \left\{ \begin{cases} m | m \neq m', \beta_{i,m} = 0, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 1 \end{cases}, k \in K_{m'}^M, \right. \\ \left. \begin{cases} m | \beta_{i,m} = 0, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 1 \end{cases}, k \in K_n^P, \right.$$

$$M_{k,2} = \left\{ \begin{cases} m | m \neq m', \beta_{i,m} = 1, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 0 \end{cases}, k \in K_{m'}^M, \right. \\ \left. \begin{cases} m | \beta_{i,m} = 1, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 0 \end{cases}, k \in K_n^P, \right.$$

$$M_{k,3} = \left\{ \begin{cases} m | m \neq m, \beta_{i,m} = 0, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 0 \end{cases}, k \in K_{m'}^M, \right. \\ \left. \begin{cases} m | \beta_{i,m} = 0, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 0 \end{cases}, k \in K_n^P, \right.$$

$$M_{k,4} = \left\{ \begin{cases} m | m \neq m, \beta_{i,m} = 1, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 1 \end{cases}, k \in K_{m'}^M, \right. \\ \left. \begin{cases} m | \beta_{i,m} = 1, \beta_{i,m}^{\text{fb}} = 1 \end{cases}, k \in K_n^P. \right.$$

이들 각각의 집합이 공집합인 경우와 공집합이 아닐 경

$$f_X(x) = \int_0^\infty \left| \frac{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j}{\theta_j} \right| f_{\Psi_{k,1}|\Psi_{k,2}} \left(\frac{(x + N_0)(\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j) + \Gamma_{k,i}^{\text{fb}}\psi}{\theta_j} \middle| \Psi_{k,2} = \psi \right) f_{\Psi_{k,2}}(\psi) d\psi \quad (11)$$

$$f_X(x) = \left| \frac{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j}{\theta_j} \right| \sum_{m_1 \in M_{k,1}} \sum_{m_2 \in M_{k,2}} \frac{a_{1,m_1} a_{2,m_2} (\sigma_{m_1,k}^M)^2 (\sigma_{m_2,k}^M)^2}{C_{m_1,m_2} (p^M)^2} \exp\left(-\frac{(\sigma_{m_1,k}^M)^2 (x + N_0)(\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j)}{p^M \theta_j}\right) \quad (12)$$

$$f_X(x) = \left| \frac{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j}{\theta_j} \right| \sum_{m_1 \in M_{k,1}} \sum_{m_2 \in M_{k,2}} \frac{a_{1,m_1} a_{2,m_2} (\sigma_{m_1,k}^M)^2 (\sigma_{m_2,k}^M)^2}{C_{m_1,m_2} (p^M)^2} \exp\left((x + N_0)(\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j) \left(\frac{C_{m_1,m_2}}{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}}} - \frac{(\sigma_{m_1,k}^M)^2}{p^M \theta_j} \right)\right) \quad (13)$$

$$\bar{P}_{k,i,j} \approx \sum_{m_1 \in M_{k,1}} \sum_{m_2 \in M_{k,2}} \sum_{m_3 \in M_{k,3}} \frac{a_{1,m_1} a_{2,m_2} a_{3,m_3} (\sigma_{m_2,k}^M)^2 (\sigma_{m_3,k}^M)^2}{C_{m_1,m_2} p^M ((\sigma_{m_1,k}^M)^2 (\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j) + \theta_j (\sigma_{m_3,k}^M)^2)} \exp\left(-\frac{N_0 (\sigma_{m_1,k}^M)^2 (\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j)}{p^M \theta_j}\right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k,i,j} \approx & \sum_{m_1 \in M_{k,1}} \sum_{m_2 \in M_{k,2}} \frac{a_{1,m_1} a_{2,m_2} (\sigma_{m_1,k}^M)^2 (\sigma_{m_2,k}^M)^2}{C_{m_1,m_2} p^M} \left\{ \frac{1}{(\sigma_{m_1,k}^M)^2} - \frac{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} (1 - D_{m_1,m_2})}{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} (\sigma_{m_1,k}^M)^2 - C_{m_1,m_2} p^M \theta_j} \right\} \\ & \times \sum_{m_3 \in M_{k,3}} \frac{a_{3,m_3} \Gamma_{k,i}^{\text{fb}} D_{m_1,m_2} (\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j)}{\theta_j (\sigma_{m_1,k}^M)^2 \Gamma_{k,i}^{\text{fb}} + (\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} (\sigma_{m_1,k}^M)^2 - C_{m_1,m_2} \theta_j p^M) (\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j)} \end{aligned} \quad (15)$$

우에 대한 평균 블록 오류율은 서로 다르다. 이 장에서는 이들 집합이 모두 공집합이 아닐 경우의 평균 블록 오류율만 분석하며, 이 집합들 중 하나 이상이 공집합인 경우의 평균 블록 오류율은 공집합이 없을 경우의 평균 블록 오류율 유도 과정과 동일한 과정을 통해 얻을 수 있다. 사용자 k 가 집합 $M_{k,l}, l = 1, 2, 3$,에 속한 매크로셀 기지국들에서 수신한 전력은 다음과 같으며

$$\Psi_{k,l} = \sum_{m \in M_{k,l}} p^M |h_{m,k}^M|^2, \quad (6)$$

이 전력은 hypoexponential 분포를 따르는 확률변수이므로 누적분포함수는^[7]

$$F_{\Psi_{k,l}}(\psi) = \begin{cases} 1 - \sum_{m \in M_{k,l}} a_{l,m} \exp\left(-\frac{(\sigma_{m,k}^M)^2 \psi}{p^M}\right), & \psi > 0, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

이고 위 식에서

$$a_{l,m} = \prod_{\substack{n \in M_{k,l} \\ n \neq m}} \frac{(\sigma_{n,k}^M)^2}{(\sigma_{n,k}^M)^2 - (\sigma_{m,k}^M)^2}. \quad (8)$$

그러면 매크로셀의 ABS가 β_i 에 따라 할당되었을 때

사용자 k 의 수신 SINR은 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{k,i} = \frac{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} (\Psi_{k,2} + \Psi_{k,3} + N_0)}{\Psi_{k,1} + \Psi_{k,3} + N_0} \quad (9)$$

위 식에서 $\Gamma_{k,i}^{\text{fb}}$ 는 ABS가 β_i^{fb} 에 따라 할당되었을 때의 수신 SINR이고 이 값은 중앙 제어장치와 기지국이 알고 있다.

(5)와 (9)로부터 평균 블록 오류율은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k,i,j} \approx & \Pr \left[\frac{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} (\Psi_{k,2} + \Psi_{k,3} + N_0)}{\Psi_{k,1} + \Psi_{k,3} + N_0} \leq \theta_j \right] \\ = & \Pr [(\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j) \Psi_{k,3} \leq \theta_j \Psi_{k,1} - \Gamma_{k,i}^{\text{fb}} \Psi_{k,2} - N_0 (\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j)] \\ = & \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\Psi_{k,3}}(x) f_X(x) dx, & \Gamma_{k,i}^{\text{fb}} > \theta_j, \\ \int_{-\infty}^{\infty} (1 - F_{\Psi_{k,3}}(x)) f_X(x) dx, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서 $X = \frac{\theta_j \Psi_{k,1} - \Gamma_{k,i}^{\text{fb}} \Psi_{k,2}}{\Gamma_{k,i}^{\text{fb}} - \theta_j} - N_0$ 이다.

확률변수 X 의 확률밀도함수는 다음 페이지의 (11)과

같이 주어진다. 여기서 $\Psi_{k,1}$ 과 $\Psi_{k,2}$ 는 서로 독립이므로 $f_{\Psi_{k,1}|\Psi_{k,2}}(\cdot|\Psi_{k,2}=\psi) = f_{\Psi_{k,1}}(\cdot)$ 이다. $\Psi_{k,l}, l=1, 2, 3$, 의 확률밀도함수는 (7)을 ψ 에 대해 미분하면 얻어지며, 이를 (11)에 대입하면 $(x+N_0)(\Gamma_{k,i}^{fb}-\theta_j) > 0$ 인 경우 (12)가 얻어지며, 나머지 경우 (13)이 얻어진다. 위 식에서 계수 $C_{m_1, m_2} = \frac{(\sigma_{m_1, k}^M)^2 \Gamma_{k,i}^{fb} + (\sigma_{m_2, k}^M)^2 \theta_j}{p^M \theta_j}$ 이다. (7),

(12), (13)으로부터 평균 블록 오류율은 $\Gamma_{k,i}^{fb} > \theta_j$ 인 경우 (14)와 같이, 나머지 경우 (15)와 같이 폐형(closed form)으로 얻어진다. 위 식에서 계수

$$D_{m_1, m_2} = \exp\left(-N_0(\theta_j - \Gamma_{k,i}^{fb})\left(\frac{C_{m_1, m_2}}{\Gamma_{k,i}^{fb}} - \frac{(\sigma_{m_1, k}^M)^2}{p^M \theta_j}\right)\right)$$

이다.

IV. ABS 할당 및 사용자 스케줄링 알고리즘

1. 최적화 문제 형성

우선 사용자 스케줄링을 위한 지시자를 설정한다. 매크로 기지국 m 이 서브프레임 l 에 사용자 $k \in K_m^M$ 을 스케줄할지의 여부를 가리키는 지시자를 $\rho_{l, m, k}^M$ 로 둔다. 해당 서브프레임에 사용자가 스케줄되면 $\rho_{l, m, k}^M = 1$, 그렇지 않으면 $\rho_{l, m, k}^M = 0$ 이다. 이와 비슷하게, 피코 기지국 n 이 서브프레임 l 에 사용자 $q \in K_n^P$ 을 스케줄할지의 여부를 가리키는 지시자를 $\rho_{l, n, q}^P$ 로 둔다. 해당 서브프레임에 사용자가 스케줄되면 $\rho_{l, n, q}^P = 1$, 그렇지 않으면 $\rho_{l, n, q}^P = 0$ 이다.

MCS 지시자 $s_{l, m, k}^M$ 와 $s_{l, n, q}^P$ 를 설정한다. $s_{l, m, k}^M = j$, $j=1, \dots, J$, 는 매크로 기지국 m 이 사용자 k 에게 서브프레임 l 에 MCS j 로 데이터를 전송한다는 것을 가리키며 $s_{l, n, q}^P = j$ 는 피코 기지국 n 이 사용자 q 에게 서브프레임 l 에 MCS j 로 데이터를 전송한다는 것을 가리킨다.

사용자 $k \in K_m^M$ 과 $q \in K_n^P$ 가 서브프레임 l 에서 MCS j 로 수신한 데이터의 평균 블록 오류율은 각각 $\bar{P}_{l, m, k, j}^M$ 과 $\bar{P}_{l, m, q, j}^P$ 로 두며, 이 값들은 (14)-(15)를 통해 구해진

다. 사용자 $k \in K_m^M$ 의 효용을 $u_{l, m, k}^M(j) = \log(\eta_j(1 - \bar{P}_{l, m, k, j}^M))$ 로 정의하며, 사용자 $q \in K_n^P$ 의 효용을 $u_{l, m, k}^M(j) = \log(\eta_j(1 - \bar{P}_{l, m, k, j}^M))$ 로 정의한다. 네트워크 전체 처리율 및 사용자 간 공정성을 모두 고려하기 위해 로그 효용함수를 사용한다^[8].

네트워크 전체 효용을 최대화하기 위한 최적화 문제는 아래와 같이 형성된다.

$$\max_{\beta_{l, m}, \rho_{l, m, k}^M, \rho_{l, n, q}^P} \sum_{l=1}^L \left[\sum_{m=1}^M \sum_{k \in K_m^M} \rho_{l, m, k}^M u_{l, m, k}^M(s_{l, m, k}^M) + \sum_{n=1}^N \sum_{q \in K_n^P} \rho_{l, n, q}^P u_{l, n, q}^P(s_{l, n, q}^P) \right] \quad (16)$$

subject to:

$$\beta_{l, m} \rho_{l, m, k}^M = 0, \quad \forall l, m, \forall k \in K_m^M, \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k \in K_m^M} \rho_{l, m, k}^M = L - \sum_{l=1}^L \beta_{l, m}, \quad \forall m, \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k \in K_n^P} \rho_{l, n, k}^P = L, \quad \forall n, \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L \rho_{l, m, k}^M \leq \left\lceil \frac{L - \sum_{l=1}^L \beta_{l, m}}{|K_m^M|} \right\rceil, \quad \forall k \in K_m^M, \forall m, \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L \rho_{l, n, k}^P \leq \left\lceil \frac{L}{|K_n^P|} \right\rceil, \quad \forall k \in K_n^P, \forall n, \quad (21)$$

$$P_{l, m, k, s_{l, m, k}^M}^M \leq P_t, \quad \forall k \in K_m^M, \quad (22)$$

$$P_{l, n, q, s_{l, n, q}^P}^P \leq P_t, \quad \forall k \in K_n^P. \quad (23)$$

제한 조건 (17)은 ABS에서는 매크로셀 사용자가 스케줄되지 않는다는 것을 가리킨다. 제한 조건 (18)과 (19)는 모든 일반 서브프레임에 매크로셀 사용자와 피코셀 사용자가 스케줄된다는 것을 가리킨다. 제한 조건 (20)은 사용자간 자원 할당의 공정성을 위해, 한 매크로셀 사용자가 한 프레임동안 스케줄될 수 있는 서브프레임

의 개수가 제한됨을 가리킨다. 제한 조건 (21)은 한 피코셀 사용자가 한 프레임동안 스케줄될 수 있는 서브프레임의 개수가 제한됨을 가리킨다.

2. 제안된 알고리즘

최적화 문제 (16)의 해는 가능한 모든 변수에 대한 전수검색(exhaustive search)을 통해 얻을 수 있지만 이에 대한 계산 복잡도가 매우 크다. 이 절에서는 전수검색보다 낮은 계산 복잡도로 (16)의 해를 구하는 알고리즘을 제안한다.

알고리즘 기술을 위해, 다음의 기호들을 사용한다. \mathbf{U}_m^M 과 \mathbf{U}_n^P 은 각각 매크로셀 m 의 모든 사용자의 효용을 나타내는 $|K_m^M| \times L$ 행렬과 피코셀 n 의 모든 사용자의 효용을 나타내는 $|K_n^P| \times L$ 행렬을 가리킨다. $[\cdot]_{i,j}$ 는 행렬의 (i,j) 번째 성분을 가리키며 $[\cdot]_{:,j}$ 는 행렬의 j 번째 열벡터를 가리킨다. u_{tot} 는 네트워크 전체 효용, u_{tot}^{\max} 는 네트워크 전체 효용의 최대값을 가리킨다. x^{opt} 는 x 의 최적값을 가리키며 \mathbf{x}^{opt} 는 벡터 \mathbf{x} 의 최적값을 가리킨다. 집합 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{2^M}\}$ 에서 중복을 포함하여 L 개의 벡터를 뽑는 경우의 수는 $\binom{L+2^M-1}{L}$ 이며, $i, i=1, 2, \dots, \binom{L+2^M-1}{L}$, 번째 경우의 수에 따라 뽑힌 벡터의 집합을 C_i 로 둔다.

제안된 알고리즘에서는 먼저 변수들이 초기화된다. 이후의 과정은 한 프레임에 ABS를 할당하는 경우의 수 i 에 대해 기술되며, 이는 모든 가능한 경우의 수에 대해 반복된다. 경우의 수 i 에 대해 ABS 할당 및 사용자 스케줄링은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 모든 서브프레임에서 각 사용자의 평균 블록 오율과 데이터 전송을 위한 MCS를 결정한다. 다음으로 각 셀의 효용을 나타내는 \mathbf{U}_m^M 과 \mathbf{U}_n^P 을 계산한다.

두 번째 단계에서는 각 셀에서 한 프레임 동안의 합 효용을 최대로 하는 사용자들을 Hungarian 알고리즘에 따라 선택한다^[9]. 선택한 사용자들을 스케줄할 때 네트워크 전체 효용이 최대화되는 경우, 해당 프레임의 ABS를 경우의 수 i 에 따라 할당하며 선택된 사용자들을 스케줄한다.

Initialization

Set $\mathbf{U}_m^M = 0, \forall m; \mathbf{U}_n^P = 0, \forall n.$

Set $u_{\text{tot}}^{\max} = 0.$

For $i = 1 : \binom{L+2^M-1}{L}$

Step 1.

Set $\rho_{l,m,k}^M = 0, \forall l, m, \forall k \in K_m^M;$

$\rho_{l,n,q}^P = 0, \forall l, m, \forall q \in K_n^P.$

Sort the vectors in C_i according to the number and locations of 1's.

Set $b_l, l = 1, 2, \dots, L,$ to be the sorted vectors.

Compute $\bar{P}_{l,m,k,j}^M, \forall l, m, k, j,$ and $\bar{P}_{l,m,q,j}^P, \forall l, n, q, j,$ for ABS assignment by $b_l.$

Set $s_{l,m,k}^M = \arg \max_{\{j | \bar{P}_{l,m,k,j}^M \leq P_l\}} \eta_j, \forall m, k.$

Set $s_{l,n,q}^P = \arg \max_{\{j | \bar{P}_{l,n,q,j}^P \leq P_l\}} \eta_j, \forall n, q.$

Set $[\mathbf{U}_m^M]_{k,l} = u_{l,m,k}^M(s_{l,m,k}^M), \forall l, m, k.$

Set $[\mathbf{U}_n^P]_{q,l} = u_{l,n,q}^P(s_{l,n,q}^P), \forall l, n, q.$

Step 2.

Choose a component from each column of

$\mathbf{U}_m^M, \forall m,$ and $\mathbf{U}_n^P, \forall n,$

by Hungarian algorithm.

Set $\rho_{l,m,k}^M = 1$ for the index of chosen component, $k,$ from $[\mathbf{U}_m^M]_{:,l}.$

Set $\rho_{l,n,q}^P = 1$ for the index of chosen component, $q,$ from $[\mathbf{U}_n^P]_{:,l}.$

Compute u_{tot} for given $b_l, \rho_{l,m,k}^M, \rho_{l,n,q}^P.$

If $u_{\text{tot}} > u_{\text{tot}}^{\max}$

Set $u_{\text{tot}}^{\max} = u_{\text{tot}}, b_l^{\text{opt}} = b_l, \rho_{l,m,k}^{M,\text{opt}} = \rho_{l,m,k}^M,$

and $\rho_{l,n,q}^{P,\text{opt}} = \rho_{l,n,q}^P.$

End if

End For

알고리즘 1. 제안된 ABS 할당 및 사용자 스케줄링 알고리즘

Algorithm 1. Proposed ABS allocation and user scheduling algorithm.

제안된 알고리즘은 한 프레임에 ABS를 할당하는 모든 2^{ML} 개의 경우 중에서 달성할 수 있는 합 효율이 동일한 경우를 제외하고, 사용자를 스케줄할 때 전수검색 대신 Hungarian 알고리즘을 사용하여 전수검색보다 계산 복잡도는 낮추면서 전수검색과 동일한 합 효율을 달성한다.

제안된 알고리즘에서 ABS를 할당하는 경우의 수는 $\binom{L+2^M-1}{L}$ 이며, 이 수의 상계는 $\left(\frac{e(L+2^M-1)}{L}\right)^L$ 이다^[10]. 그리고 한 셀에 대해 Hungarian 알고리즘을 수행하는 데에 필요한 계산 복잡도는 $O(K^3)$ 이며^[9], 위 식에서 K 는 사용자의 수이다. 따라서 제안된 알고리즘의 계산 복잡도는 $O\left(K^3(M+N)\left(\frac{e(L+2^M-1)}{L}\right)^L\right)$ 이며, 이는 전수 검색의 계산 복잡도인 $O(2^{LM}K^{MN})$ 보다 훨씬 낮다.

V. 컴퓨터 모의실험

컴퓨터 모의실험에서는 네트워크 내의 모든 사용자가 균일하게 분포한 경우를 고려하였다. 매크로 기지국의 전송 전력과 피코 기지국의 전송 전력은 각각 46 dBm, 30 dBm으로 설정하였다^[11]. $P_t = 0.1$, $N_0 = -174$ dBm으로 설정하였다. 기지국간의 최소 거리, 각 셀의 경로손실 계수 등은 3GPP에서 설정한 모의실험 값을 사용하였다^[11]. 기존의 eICIC 논문과 동일하게^[2-3], 사용자는 모든 매크로 기지국이 ABS를 설정하지 않거나, 모든 매크로 기지국이 ABS를 설정한 경우의 수신 SINR만을 측정한다고 가정하였다. 즉, $C = 2$ 이며, $\beta_1 = [0, \dots, 0]^T$, $\beta_2 = [1, \dots, 1]^T$ 이라고 가정하였다. 컴퓨터 모의실험은 10개의 프레임에 대해 1,000회 수행되었으며, 매 프레임마다 채널이 독립적으로 변한다고 가정하였다.

다음과 같은 3가지 알고리즘을 비교한다: 전수검색, 제안된 알고리즘, 그리고 기존 알고리즘이다. 기존 알고리즘에서는 우선 네트워크 전체 사용자 중 피코셀 경계 사용자의 비중에 따라 ABS를 설정한다^[3]. 그 이후, 설정된 ABS 하에서 네트워크 전체 효율을 최대화하도록 사용자를 스케줄한다.

표 1에서는 $M = 2$, $N = 2$, $L = 4$ 이며 네트워크 전

표 1. $M = 2$, $N = 2$, $L = 4$ 일 때의 알고리즘 별 네트워크 전체 처리율 및 연산 소요시간

Table 1. Network total throughput and execution time of the algorithms for $M = 2$, $N = 2$, and $L = 4$.

	전수 검색	제안된 알고리즘	기존 알고리즘
처리율 (bps/Hz)	12.205	12.205	10.364
소요시간 (ms)	17,250	39.56	10.44

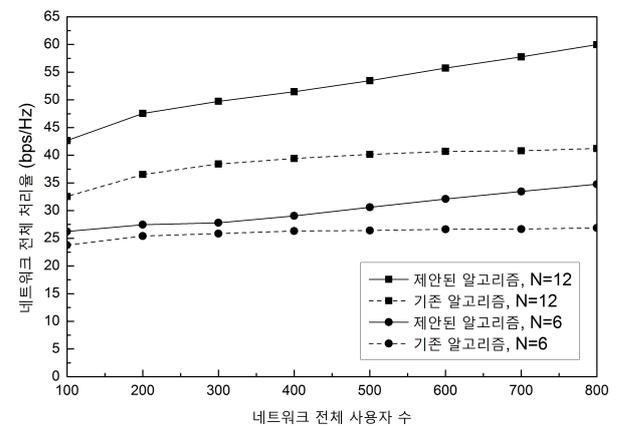


그림 1. 네트워크 전체 사용자 수에 따른 네트워크 전체 처리율

Fig. 1. Network total throughput versus total number of users in the network.

체 사용자 수가 10일 때, 전수 검색, 제안된 알고리즘, 기존 알고리즘 각각으로 달성하는 네트워크 전체 처리율 및 연산 소요시간을 보인다. 제안된 알고리즘이 전수 검색과 동일한 전체 처리율을 달성하며 기존 알고리즘보다 높은 전체 처리율을 달성하는 것을 보인다. 또한 제안된 알고리즘의 연산 소요시간이 기존 알고리즘의 3.8배이며, 전수 검색의 약 $\frac{1}{400}$ 인 것을 보인다.

그림 1에서는 $M = 3$, $L = 8$ 일 때 네트워크 전체 사용자 수에 따른 네트워크 전체 처리율을 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘^[3]에 대하여 비교하였다. 전수 검색에 대한 결과는 연산 시간이 매우 길게 소요되어 얻지 못하였다. 피코셀의 수 $N = 6$ 일 때와 $N = 12$ 일 때 모두 제안된 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 높은 네트워크 전체 처리율을 달성한다. 네트워크에 피코셀의 수가 많을수록, 제안된 알고리즘에 의한 성능 향상 정도가 커지는 것을 확인한다.

그림 2에서는 $M = 3$, $L = 8$ 일 때 네트워크 전체 사

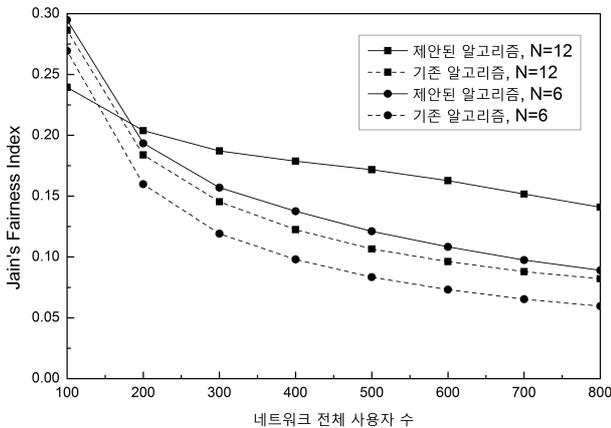


그림 2. 네트워크 전체 사용자 수에 따른 공평성 지수
Fig. 2. Fairness index versus total number of users in the network.

용자 수에 따른 공평성 지수(JFI: Jain's fairness index)를 비교하였다. 전수 검색에 대한 결과는 연산 시간이 매우 길게 소요되어 얻지 못하였다. $N=6$ 일 때 제안된 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 공평성 지수가 높다. $N=12$ 일 때 네트워크 전체 사용자 수가 200 미만이면 제안된 알고리즘의 공평성 지수가 기존 알고리즘에 비해 낮지만, 네트워크 전체 사용자 수가 200 이상이면 제안된 알고리즘의 공평성 지수가 기존 알고리즘에 비해 높다. 또한 피코셀의 수가 많을수록, 제안된 알고리즘에서 네트워크 전체 사용자 수 증가에 대한 공평성 지수의 하락 정도가 완만해짐을 확인한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이중 네트워크에서 네트워크 전체 효율을 최대화시키기 위해 ABS를 할당하고 각 서브프레임에 스케줄링할 사용자를 선택하는, 전수 검색보다 복잡도가 낮은 알고리즘을 제안했다. 제안된 알고리즘이 전수 검색보다 연산 소요시간이 훨씬 적은 동시에 동일한 전체 처리율을 달성하며, 기존 알고리즘보다 높은 전체 처리율을 달성하고, 사용자의 수가 많을 때 사용자간 공평성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

[1] 3GPP TS 36.300, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal

terrestrial radio access network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10)," V10.9.0, Dec. 2012.

- [2] I. Guvenc, "Capacity and fairness analysis of heterogeneous networks with range expansion and interference coordination," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 1084-1087, Oct. 2011.
- [3] S. Vasudevan, R. N. Pupala, and K. Sivanesan, "Dynamic eICIC - a proactive strategy for improving spectral efficiencies of heterogeneous LTE cellular networks by leveraging user mobility and traffic dynamics," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 10, pp. 4956-4969, Oct. 2013.
- [4] S. G. Kiani and D. Gesbert, "Optimal and distributed scheduling for multicell capacity maximization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 1, pp. 288-297, Jan. 2008.
- [5] X. Lagrange, "Multitier cell design," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 8, pp. 60-64, Aug. 1997.
- [6] A. T. Toyserkani, E. G. Strm, and A. Svensson, "An analytical approximation to the block error rate in Nakagami-m non-selective block fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 1543-1546, May 2010.
- [7] G. Bolch, S. Greiner, H. Meer, and K. S. Trivedi, *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*, 2/e. Wiley, 2006.
- [8] S. Deb, P. Monogioudis, J. Mierni, and J. P. Seymour, "Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 22, no. 1, pp. 137-150, Feb. 2014.
- [9] C. H. Papadimitriou and K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Dover Publications, 1998.
- [10] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3/e. MIT Press, 2009.
- [11] 3GPP, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects (TR 36.814)," Mar. 2010.

저 자 소 개



박 진 현(학생회원)
2010년 서울대학교 전기공학부
학사 졸업.
2010년~현재 서울대학교 전기
정보공학부 석박사통합
과정.

<주관심분야 : 무선통신, 협력통신, HetNet>



이 재 홍(정회원)
1976년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1978년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
1986년 University of Michigan,
Ann Arbor, 전기공학과
박사 졸업.

1987년~현재 서울대학교 전기정보공학부 교수.
<주관심분야 : 디지털통신, 부호이론, MIMO,
OFDM, 협력통신, V2V>