JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 20, No. 3 : 477~483 Mar. 2016

다중 셀 상향링크 네트워크에서 신호와 간섭을 동시에 고려하는 전력 제어 및 사용자 스케쥴링

조문제[1] · 정방철[2*] · 반태원[1]

Joint User Scheduling and Power Control Considering Both Signal and Interference for Multi-Cell Networks

Moon-Je Cho[1] · Bang Chul Jung[2*] · Tae-Won Ban[1]

[1]Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea
[2*]Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

요 약

본 논문은 다중 셀 상향링크 네트워크에서 사용자의 신호 대 발생 간섭 및 잡음비 (SGINR)를 최대화하기 위하여 간섭인지 및 전력제어 기술을 이용한 분산 스케쥴링 방식을 제안한다. 먼저 시분할 시스템의 상호 호환성 특성을 이용하여 각 사용자는 인접 기지국으로부터 받은 파일럿 신호를 통하여 채널을 습득하고 데이터 전송 시 인접 셀 기지국들에 미칠 간섭을 각자 계산할 수 있다고 가정한다. 제안한 스케쥴링은 사용자가 인접 셀 기지국에 미치는 간섭의 양을 계산하여 미리 결정된 임계값보다 클 경우 자기 신호의 송신 전력을 낮추는 전력 제어 알고리즘을 이용하여 사용자를 분산적으로 선택한다. 제안한 기법의 상향링크 데이터 전송률은 기존의 사용자 스케쥴링 알고리즘들에 비하여 월등히 좋은 성능을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a distributed user scheduling with interference-aware power control (IAPC) to maximize signal to generating interference plus noise ratio (SGINR) in uplink multi-cell networks. Assuming that the channel reciprocity time-division duplexing (TDD) system is used, the channel state information (CSI) can be obtained at each user from pilot signals from other BSs. In the proposed scheduling, to be specific, each user reduces the transmit power if its generating interference to other BSs is larger than a predetermined threshold. Each BS selects the user with the largest SGINR among users. Simulation results show that the proposed technique significantly outperforms the existing user scheduling algorithms. It is worth noting that the proposed technique operates with distributed manner without information exchange among cells. Hence, it can be easily applied to the practical wireless systems like 3GPP LTE without significant modifications of the specification.

키워드 : 셀롤라 네트워크, 셀 간 간섭, 신호 대 발생 간섭 및 잡음비 (SGINR), 사용자 스케쥴링, 전력제어

Key word : Cellular networks, Inter-cell Interference, SGINR, User Scheduling, Power Control

Received 15 December 2015, **Revised** 04 January 2016, **Accepted** 18 January 2016

*** Corresponding Author** Bang Chul Jung (E-mail:bcjung@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-6580)
Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Open Access **http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.3.477** print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

스마트폰과 같은 무선 단말기의 보급으로 매년 데이터 트래픽은 기하급수적으로 증가하고 단말기의 분포는 고밀집화 되고 있다[1]. 이러한 환경에서 셀 내 혹은 셀 간의 간섭의 영향이 매우 커진다. 특히, 셀 간의 간섭은 다중 셀 셀롤러 네트워크에서 주요 이슈 중 하나로 고려된다. 이러한 다중 셀 상향링크 통신에서 각 기지국의 신호 대 간섭 및 잡음비 (SINR)은 인접 셀에서 선택된 사용자에 의해 결정되고, 일반적으로 기지국은 이러한 정보를 알 수 없다.

간섭 문제를 해결하기 위해서 수많은 연구가 이루어졌고, 그 중 Cadambe와 Jafar가 제안한 간섭 정렬 기술(IA)가 눈에 띄는 결과를 보여준다. 이 기술로 시변 채널에서 K 명의 사용자 간섭 채널의 최적의 자유도(DoF) $K/2$를 얻을 수 있다. 게다가 몇몇의 IA 기반 간섭 정렬 기술이 제안되었다[2, 3]. 최근에는 다중 셀 상향링크와 하향링크 네트워크에 대한 기회주의적 간섭 정렬(OIA) 기술이 제안되었다[4-9]. 기회주의적 간섭 정렬 기술의 기본적인 아이디어는 각 사용자의 셀 간 간섭을 미리 결정된 간섭 공간에 기회적으로 정렬시키기 위해 다중 사용자 다이버시티를 이용하는 것이다. 구체적으로, 각 기지국은 미리 결정된 간섭 방향 벡터를 전체 네트워크의 모든 사용자에게 전송한다. 그런 후 각 사용자는 인접 셀로 미치는 간섭의 양을 계산하여 해당 기지국으로 전송한다. 이러한 방식은 전체 네트워크의 상태 정보를 요구하지 않는다. 게다가 특정한 사용자 스케일링 조건을 만족할 때, OIA 기술로 최적의 자유도가 달성 가능하다[5,6,8].

대부분의 간섭 정렬 기술은 간섭을 줄이는데 초점을 맞추지만, 실제 셀롤러 네트워크의 성능의 지표가 되는 전송률, 전송 지연 시간, 사용자간 공평성 등을 높이려면 자기 신호 세기를 고려하는 것이 중요하다. Single-input single-output(SISO) 상향링크 네트워크에 대한 임계값 기반 사용자 스케쥴링 알고리즘이 제안되었다. 여기서 각 기지국은 각 사용자가 기지국으로 발생시키는 간섭의 양이 특정 임계값보다 낮은 사용자 중에서 자기 신호 세기가 가장 큰 사용자를 선택하게 된다[10]. 유사하게, 다중 안테나 상향링크 네트워크에서 초기의 OIA 기술의 전송률을 향상시키는 기술이 제안되었다[11]. 그러나 앞서 제안된 [10, 11]의 기술에서 기지국이 사용자를 스케쥴링 할 때, 사용자의 발생 간섭이 특정 임계값보다 크면 스케쥴링에서 제외시켰다. 문헌[12]에서는 제외된 사용자에게 전력 제어를 이용하여 모든 사용자가 선택될 수 있고, 이러한 사용자 스케쥴링 이득을 통한 성능 향상을 나타낸다.

본 논문에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 사용자의 신호 대 발생 간섭 및 잡음비 (SGINR)를 최대화하기 위하여 간섭인지 및 전력제어 기술을 이용한 분산 스케쥴링 방식을 제안한다. 문헌 [13-15]에서 SGINR의 기본적인 아이디어가 제안되었다. 제안한 스케쥴링은 사용자가 인접 셀 기지국에 미치는 간섭의 양을 계산하여 미리 결정된 임계값보다 클 경우 자기 신호의 송신 전력을 낮춘다. 그리고 기지국은 SGINR이 가장 큰 사용자를 선택한다. 제안한 스케쥴링은 임계값에 의해 스케쥴링에서 제외된 사용자를 송신 전력 제어 기술을 이용함으로써 모든 사용자가 상향링크 전송을 위해 선택될 수 있고, 기지국은 사용자의 조절된 전력을 포함하여 가장 큰 유효 채널 이득을 갖는 사용자를 선택한다. 여기서 주목해야 할 점은 단지 지역적 정보만으로 모든 절차가 이루어진다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장은 시스템 모델 및 채널 모델에 대해 소개하고 제 3장은 기존의 사용자 스케쥴링 기법들을 소개한다. 제 4장에서는 간섭 인지 및 송신 전력 제어 기술을 이용한 분산적 사용자 스케쥴링 방법을 제안하고 제 5장은 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보여준다. 제 6장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 실제적인 셀롤러 네트워크를 비교적 잘 묘사하는 시분할 간섭 다중 접속 체널 모델을 고려한다[6]. 전체 네트워크에는 K 셀이 존재하고 각 셀에는 하나의 기지국과 N명의 사용자가 있다. 그리고 각 기지국과 사용자는 단일 안테나를 가진다. 그림 1에서는 $K=2, N=3$ 인 경우의 SISO IMAC 모델을 나타낸다. 여기서 각 기지국은 해당 셀의 사용자의 통신에만 관여한다. 전송 블록 동안 채널 매트릭스가 일정한 값을 가지는 블록 페이딩을 가정하고 모든 전송 블록 간에 독립적으로 변함을 가정한다.

기지국 i에서 수신된 신호 $y_i \in \mathbb{C}$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

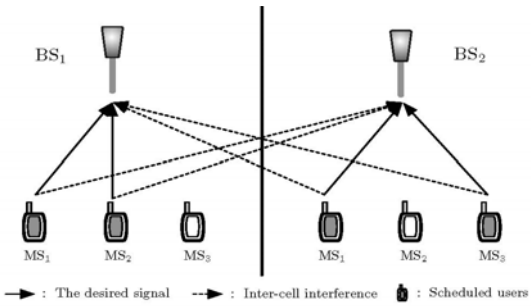

Fig. 1 SISO IMAC model where $K=2, N=3$.

$$y_i = \sqrt{P^{[i,j]}}\, h_i^{[i,j]} x^{[i,j]} + \sum_{k=1, k\neq i}^{K} \sqrt{P^{[k,j]}}\, h_i^{[k,j]} x^{[k,j]} + z_i, \quad (1)$$

여기서 $P^{[i,j]}(\leq P)$와 $x^{[i,j]}$는 i번째 셀에 사용자 j의 전력과 심볼을 각각 나타내고, P는 사용자의 최대 송신 전력이다. 각 사용자는 동일한 전력을 사용한다고 가정한다. 그리고 $j\in\mathbb{N}\triangleq\{1,\cdots,N\}$ 이고 $i,k\in\mathbb{K}\triangleq\{1,\cdots,K\}$이다. $h_k^{[i,j]}\in\mathbb{C}$ 는 i번째 셀의 사용자 j와 k번째 기지국간의 채널 벡터를 나타낸다. 여기서 채널 벡터의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 가지며, i, k 간의 서로 독립임을 가정한다. 시분할 상호 호환성 특성으로 각 사용자는 기지국으로부터 받은 파일럿 신호를 통해 외부 셀 기지국으로의 상향링크 채널 $h_k^{[i,j]}$을 정확히 측정할 수 있다. $z_i\in\mathbb{C}$는 평균이 0이고 분산이 N_0인 복소 백색 가우시안 잡음으로 가정한다. 즉, $z_i\sim(0,N_0)$이다. 여기서 N_0는 잡음의 스펙트럴 밀도이다. 또한 $\mathbb{E}[|x^{[i,j]}|^2]=1$로 가정하고, 신호 대 잡음 비(SNR)는 P/N_0로 가정한다. 본 시스템 모델에서 주목해야 할 부분으로 기지국간의 정보 교환이나 기지국 간의 협력은 이루어지지 않는다.

Ⅲ. 기존의 스케줄링 기법들

3.1. 신호 대 간섭비 최대화 기반 스케줄링 (Max-SNR)

Maximize signal-to-noise ratio (Max-SNR)은 사용자간 상호 간섭은 전혀 고려하지 않고 오직 각 사용자의 신호 세기 성분이 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법으로 선택되는 사용자는 다음과 같은 수식으로 결정된다.

$$S_{MaxSNR} = \arg\max_j |\sqrt{P}\, h_i^{[i,j]}|^2 \quad \text{for } j=1,2,\ldots,N \quad (2)$$

3.2. 간섭 최소화 기반 스케줄링 (Min-INR)

Minimize interference-to-noise ratio (Min-INR) 스케줄링 알고리즘은 원하는 사용자의 신호 세기 부분은 고려하지 않고 오직 인접 셀로 발생시키는 간섭이 가장 작은 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법으로 선택되는 사용자는 아래의 수식으로 결정된다.

$$S_{MinINR} = \arg\min_j \sum_{k=1, k\neq i}^{K} |\sqrt{P}\, h_k^{[i,j]}|^2 \quad \text{for } j=1,2,\ldots,N,\ k=1,2,\ldots,K \quad (3)$$

3.3. 신호대 생성 간섭비 최대화 기반 스케줄링 (Max-SGINR)

Maximizing signal to generated interference and noise ratio (Max-SGINR) 스케줄링 알고리즘은 각 사용자의 신호 대 인접 셀로의 발생 간섭비가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법으로 선택되는 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{MaxSGINR} = \arg\max_j \frac{|\sqrt{P}\, h_i^{[i,j]}|^2}{1+\sum_{k=1, k\neq i}^{K} |\sqrt{P}\, h_k^{[i,j]}|^2} \quad \text{for } j=1,2,\ldots,N,\ \ k=1,2,\ldots,K \quad (4)$$

3.4. 전력제어를 이용한 임계치 기반 분산 사용자 스케줄링 (TDUS-PC)

먼저 threshold-based distributed user scheduling (TDUS) 알고리즘은 각 사용자의 신호 중에 3.2절에서 계산한 간섭의 양 (INR)이 미리 결정된 임계치보다 작으면서 신호의 크기가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다 [10]. 이 스케줄링 기법을 통하여 선택되는 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{TDUS} = \arg\max_j \left| \sqrt{P}\, h_i^{[i,j]} \right|^2 \quad (5)$$

$$\text{for } j = 1, 2, ..., N$$

$$s.t. \sum_{k=1, k \neq i}^{K} |\sqrt{P}\, h_k^{[i,j]}|^2 SNR \leq \eta_I \quad (6)$$

$$\text{for } k = 1, 2, ..., K$$

여기서 식 (6)은 인접 셀에 발생시키는 간섭의 양을 미리 결정된 임계값 η_I에 의해 사용자 선택 범위를 제한하는 식이다. 따라서 각 사용자 중 (6)식의 조건을 만족하지 않는 사용자는 스케쥴링 후보에서 제외된다.

문헌 [10]에서 제외된 사용자의 송신 전력을 제어하여 스케쥴링 이득을 극대화 시킬 수 있는 threshold-based distributed user scheduling with power control (TDUS-PC) 기술이 제안되었다[12]. TDUS-PC는 식 (6)의 조건을 만족하면 데이터를 전송하게 하고 만약 식 (6)을 만족하지 못하면 자신의 송신 전력을 낮추어 식 (6)을 만족하도록 한다. 다음의 식에 따라 사용자의 송신 전력을 조절하고 데이터 전송 할 사용자를 결정한다.

$$S_{TDUS-PC} = \arg\max_j |\sqrt{\widetilde{P^{[i,j]}}}\, h_i^{[i,j]}|^2 \quad (7)$$

$$\text{for } j = 1, 2, ..., N$$

$$\widetilde{P^{[i,j]}} = \min \left\{ P, \left\{ \eta_I / \left(\sum_{k=1, k \neq i}^{K} \left| \sqrt{P}\, h_k^{[i,j]} \right|^2 SNR \right) \right\} \right. \quad (8)$$

여기서 $\widetilde{P^{[i,j]}}$는 i 번째 셀에서 사용자 j의 조절된 송신 전력를 나타낸다.

Ⅳ. 제안된 간섭인지 및 전력제어 기반 분산 스케쥴링

본 장에서는 간섭인지 및 전력제어를 이용한 분산 사용자 스케쥴링에 대한 전체적인 절차를 설명한다.

4.1. 초기화 (기준 신호 및 간섭 임계값 전송)

각 기지국은 미리 결정된 기준 신호를 해당 셀의 사용자 및 인접 셀의 사용자에게 전달하여 무선 채널 정보를 알게 해준다. 따라서 각 사용자는 기준 신호를 알 수 있고 채널을 완전히 측정 할 수 있음을 가정한다. 또한, 각 기지국은 미리 결정된 임계값 η_I를 전송한다. 여기서 임계값 η_I는 사용자가 인접 기지국으로 미치는 간섭의 최대 허용치를 나타내고, P에 의해 정규화된다.

4.2. 단계 1 (간섭인지 및 전력제어 기술 및 스케쥴링 매트릭스 피드백)

각 사용자는 파일럿 신호를 통하여 자기 신호가 기지국으로 미치는 모든 채널 정보를 알 수 있으므로, 인접 기지국으로 미치는 간섭의 양을 측정할 수 있다. 그래서 i 번째 셀에서 사용자 j가 k번째 기지국으로 미치는 간섭의 양을 다음의 식에 따라 나타낸다.

$$\eta_k^{[i,j]} = \| h_k^{[i,j]} \|^2. \quad (9)$$

여기서 $i \in \mathrm{K}, j \in \mathbb{N}, k \in \mathrm{K}/i = \{1, \cdots, i-1, i+1, \cdots, K\}$ 이다. 그런 후에 i번째 셀에 사용자 j의 발생 간섭의 총합은 다음과 같이 주어진다.

$$\eta^{[i,j]} = \sum_{k=1, k \neq i}^{K} \| \eta_k^{[i,j]} \|^2. \quad (10)$$

그런 후, 제안한 스케쥴링에서 i 번째 셀에 사용자 j의 송신 전력은 다음과 같이 결정된다.

$$P^{[i,j]} = \begin{cases} P, & \text{if } \eta^{[i,j]} \leq \eta_I \\ \dfrac{\eta_I}{\eta^{[i,j]}} \cdot P, & otherwise \end{cases} = \min \left\{ P, \frac{\eta_I}{\eta^{[i,j]}} \cdot P \right\}. \quad (11)$$

이러한 전력 제어 기술은 각 사용자가 인접 셀로 발생시키는 간섭의 양에 따라서 자기 전력을 조절하게 된다. 그리고 송신 전력을 기반으로 i번째 셀에 사용자 j의 유효 자기 채널 이득은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho^{[i,j]} \triangleq P^{[i,j]} \cdot \| h_i^{[i,j]} \|^2. \quad (12)$$

이렇게 계산된 사용자의 유효 채널 이득은 통신 중

인 기지국으로 피드백되어 스케쥴링 매트릭스에 포함된다.

4.3. 단계 2 (사용자 선택 및 상향링크 통신)

기지국은 서비스 중인 셀에서 사용자 N명의 스케쥴링 매트릭스를 받으면 Max-SGINR 스케쥴링 알고리즘 이용하여 신호 대 발생 간섭 및 잡음비가 가장 큰 사용자를 선택한다. 이 스케쥴링 기법으로 선택되는 사용자는 아래의 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{MaxSGINR}^{IAPC} = \arg\max_j \frac{\left| \sqrt{P^{[i,j]}} \cdot \| h_i^{[i,j]} \| \right|^2}{1 + \sum_{k=1, k \neq i}^{K} \left| \sqrt{P^{[i,j]}} h_k^{[i,j]} \right|^2} \quad (13)$$

$$\text{for } j = 1, 2, ..., N, \quad k = 1, 2, ..., K$$

여기서 각 사용자는 자신의 채널 정보를 알고 있으므로 송신 전력 조절을 기지국의 개입 없이 분산적으로 계산한다. 그런 후 선택된 사용자는 통신 중인 기지국으로 데이터를 전송한다.

Ⅴ. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 제안한 간섭인지 및 전력제어 기술을 이용한 분산 사용자 스케쥴링의 성능을 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 공정한 비교를 위해서 기존의 스케쥴링 기술 및 제안한 기술은 분산적 방법으로 동작하도록 하고, 기지국 간의 어떠한 정보 교환도 요구하지 않는다. 기존의 기술로는 MaxSNR, MinINR, SGINR, TDUS-PC을 고려하였다. 여기서 MaxSNR 스케쥴링 알고리즘은 인접 셀 간의 상호 간섭은 전혀 고려하지 않고 오직 각 사용자의 신호 세기 성분이 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이고, MinINR 스케쥴링 알고리즘은 원하는 사용자의 신호 세기 성분은 고려하지 않고 오직 인접 셀로 발생시키는 간섭이 가장 작은 사용자를 선택하는 방법이다. SGINR 스케쥴링 알고리즘은 사용자의 자기 신호 대비 인접 셀로 발생시키는 간섭 및 노이즈 신호의 비율이 가장 큰 사용자를 선택한다. 그리고 TDUS-PC 스케쥴링 알고리즘은 각 사용자의 인접 기지국으로 미치는 간섭 양을 측정하여 미리 결정된 임계값보다 크면 사용자의 송신 전력을 낮추어 모든 사용자가 스케쥴링 후보가 되도록 만들고, 이러한 사용자 중 채널 이득이 가장 큰 사용자를 선택한다. 여기서 기지국으로 미치는 간섭에 대한 미리 결정된 임계값은 전송률 성능 영향을 미치므로 데이터 전송 전에 신중히 결정된다.

그림 2은 $K=2, N=100$인 경우와 SNR에 따른 기존의 기술과 제안한 기술의 전송률 성능을 나타낸다. 제안한 기술은 주어진 SNR 영역에서 다른 기술에 비해 월등한 데이터 전송률을 나타내고 있다. 예를 들어, 제안된 기법은 SNR 30dB에서 기존 기법 중 가장 성능이 좋은 SGINR 기법에 비하여 128%의 성능을 보인다.

그림 3은 $K=3, N=100$인 경우로, 셀의 수가 증가되어도 제안한 기술이 기존의 기술보다 더 나은 성능을 보이고 있다. 예를 들어, 제안된 기법은 SNR 30dB에서 SGINR 기법에 비하여 158%의 성능을 보인다. 다만 이 환경에서는 기존 기술 중 TDUS-PC 기법의 성능이 제안한 기법과 비슷하다.

그림 4는 $K=2$, SNR=10dB인 경우에 사용자 수에 따른 데이터 전송률 성능을 나타낸다. 제안한 기술을 포함한 모든 기술은 다중 사용자 다이버서티로 인해 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 제안한 기술의 성능이 다른 기법들에 비하여 가장 높음을 확인할 수 있다. 이는 다른 기술에 비하여 사용자 다이버서티 효과를 더욱 효과적으로 얻을 수 있음을 의미한다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 사용자의 신호 대 발생 간섭 및 잡음비 (SGINR)를 최대화시키기 위하여 간섭인지 및 전력제어 기술을 이용한 분산 스케쥴링 방식을 제안한다. 제안된 간섭인지 및 전력제어 기반 분산 스케쥴링 방식은 기존의 방식들에 비하여 월등히 좋은 데이터 전송률을 달성하는 것을 확인하였다. 따라서 상향링크에서 사용자를 선택할 때 간섭 뿐 아니라 신호의 세기로 함께 고려하는 것이 향후 시스템 성능을 향상시키는 좋은 방식임을 확인할 수 있다.

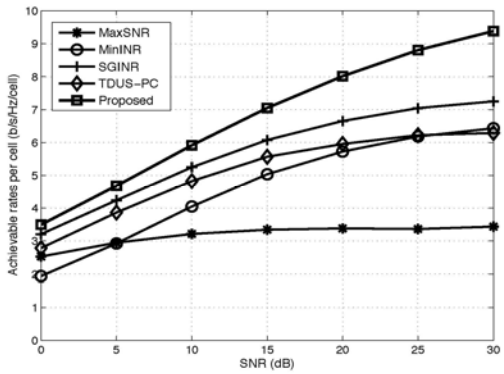

Fig. 2 Sum-rates versus SNR for varying SNR when $K=2, N=100$.

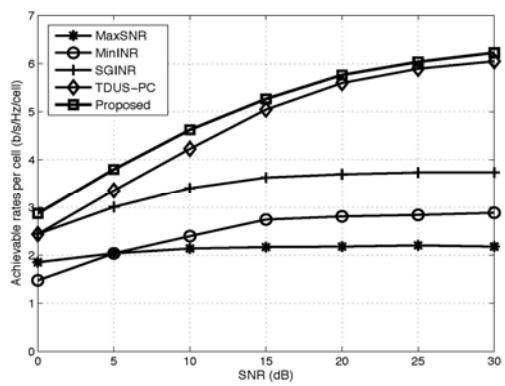

Fig. 3 Sum-rates versus SNR for varying SNR when $K=3, N=100$.

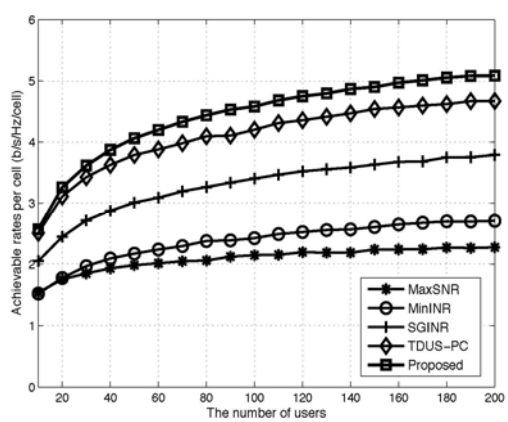

Fig. 4 Sum-rate versus the number of users in each cell when $K=3,$,SNR$=10dB$.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the IITP grant funded by the Korea government (MSIP) (No. B0126-15-1064, Research on Near-Zero Latency Network for 5G Immersive Service)

REFERENCES

[1] CISCO, "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2014–2019," *white paper*, Mar. 2015.

[2] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for celluar networks," in *Proc. 46th Annual Allerton Conf. on Commun., Control, and Computing*, Monticello, IL, Sep. 2008.

[3] C. Suh, M. Ho, and D. Tse, "Downlink interference alignment," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 9, pp. 2616–2626, Sep. 2011.

[4] B. C. Jung and W.-Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 148–150, Feb. 2011.

[5] B. C. Jung, D. Park, and W. -Y. Shin, "Opportunistic interference mitigation achieves optimal degrees-of-freedom in wireless multi-cell uplink networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 7, pp. 1935–1944, Jul. 2012.

[6] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2180–2192, May 2013.

[7] H. J. Yang, B. C. Jung, W. -Y. Shin, and A. Paulraj, "Codebook-based opportunistic interference alignment," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 62, no. 11, pp. 2922-2937, Jun. 2014.

[8] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, C. Suh, and A. Paulraj, "Opportunistic downilnk interference alignment," in *Proc. IEEE ISIT*, pp. 1588-1592, Jun. 2014.

[9] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and C. Suh, "Opportunistic interference alignment for interfering

broadcasting channels," *IEEE ICASSP*, May 2014.

[10] W. -Y. Sin, D. Park, and B. C. Jung, "Can one achieve multiuser diversity in uplink multi-cell networks?," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 12, pp. 3535-3540, Dec. 2012.

[11] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "A Feasibility study on opportunistic interference alignmnet: Limited feedback and sum-rate enhancement," *Asiloma Conference on Signals, Systems, and Computers*, Nov. 2012.

[12] M. -J. Cho, T. -W. Ban, B. C. Jung, and H. J. Yang, "A distributed scheduling with interference-aware power control for ultra-dense networks", *IEEE ICC 2015*, Jun. 2015.

[13] B. Lee, H. Je. O.S. Shin, and K. B. Lee, “A novel uplink MIMO transmission scheme in a multicell environment,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 10, pp. 4981-4987, Oct. 2009

[14] M. Sadek, A. Tarighat, and A.H. Sayed, "A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user mimo channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 5, pp. 1711-1721, May 2007.

[15] M. Sadek, A. Tarighat, and A.H. Sayed, " Active antenna selection in multiuser mimo communications", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 55, no. 4, pp. 1498-1510, 2007.

조문제(Moon-Je Cho)

2012년 8월 경상대학교 정보통신공학과 학사
2012년 9월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 석박사통합과정
※관심분야 : 이동통신, 신호처리, 다중안테나, 사용자 스케줄링

정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
2008년 3월~2009년 8월 KAIST IT융합연구소 팀장
2009년 9월~2010년 2월 KAIST IT융합연구소 연구교수
2010년 3월~2014년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수
2014년 3월~2015년 8월 경상대학교 정보통신공학과 부교수
2015년 9월~현재 충남대학교 전자공학과 부교수
2010년 4월~현재 KAIST IT융합연구소 겸직교수
※ 관심분야 : 무선통신시스템, 통계적 신호처리, 정보이론, 압축센싱

반태원(Tae-Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
2010년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사
2000년 2월~2012년 8월 KT 네트워크부문
2012년 9월~현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및 중계통신, 인지통신, 주파수 공유