

## 다중안테나 다중셀 네트워크에서 간섭인지 기반 전력제어 기술을 이용한 사용자 스케줄링

조문제 · 반태원 · 정방철\*

### A User Scheduling with Interference-Aware Power Control for Multi-Cell MIMO Networks

Moon-Je Cho · Tae-Won Ban · Bang Chul Jung\*

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong  
650-160, Korea

#### 요 약

본 논문은 다중 셀 기반의 다중 안테나 상향링크 네트워크에서 사용자가 인접 셀 기지국에 미치는 간섭의 양을 기반으로 송신 전력을 제어하고 사용자를 분산적으로 스케줄링 방식을 제안한다. 시분할 시스템의 상호 호환성 특성을 이용하여 각 사용자는 인접 기지국으로부터 받은 파일럿 신호를 통하여 간섭 채널을 습득하고 데이터 전송 시 인접 셀 기지국들에 미칠 간섭을 각자 계산할 수 있다고 가정한다. 각 사용자는 특이값 분해를 통해서 송신 빔포밍 벡터를 생성하고 인접 셀 기지국으로 미칠 간섭의 양을 계산하여 미리 결정된 임계값보다 클 경우 자신의 송신 전력을 낮춘다. 각 기지국에서는 사용자들 중 전력 제어된 채널 이득 값이 가장 큰 사용자를 선택한다. 제안된 기법의 상향링크 데이터 전송률은 기존의 사용자 스케줄링 알고리즘들에 비하여 월등히 좋은 성능을 보인다.

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a distributed user scheduling with transmit power control based on the amount of generating interference to other base stations (BSs) in multi-cell multi-input multi-output (MIMO) networks. Assuming that the time-division duplexing (TDD) system is used, the interference channel from users to other cell BSs is obtained at each user. In the proposed scheduling, each user first generates a transmit beamforming vector by using singular value decomposition (SVD) over MIMO channels and 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 effective channel gains among users, which reflects the adjusted power of users. Simulation results show that the proposed technique significantly outperforms the existing user scheduling algorithms.

**키워드** : 다중안테나, 셀룰러 네트워크, 셀 간 간섭, 사용자 스케줄링, 간섭인지 및 전력제어

**Key word** : MIMO, Cellular networks, Inter-cell interference, user scheduling, interference-aware power control

Received 25 March 2015, Revised 13 April 2015, Accepted 27 April 2015

\* Corresponding Author Bang Chul Jung(E-mail:bcjung@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9171)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.5.1063>

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/licenses/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

최근 사용자 단말과 기지국, 소형 셀과 같은 통신 노드들이 매우 많이 증가하였고 각 노드들 간섭도 매우 커졌다. 통신 노드들 간의 간섭은 이동통신 시스템에서 늘 중요한 문제로 여겨지고 있다. 이런 간섭 문제를 해결하기 위해서 Cadambe와 Jafar는 간섭 정렬 (interference alignment, IA) 기술을 제안하였고 이를 통하여 시변  $K$ -사용자 간섭 채널에서 최적의 자유도 (degree-of-freedom, DoF),  $K/2$ ,를 달성 할 수 있음을 증명하였다. 또한 최근 이러한 간섭 정렬 기술을 셀룰라 시스템에 적용하는 기회적 간섭 정렬 기법 (opportunistic interference alignment, OIA) 이 제안되었다[1-7]. 기회적 간섭 정렬 기술은 사용자 스케줄링 기술을 기존의 IA 프레임워크에 적용시키는데, 여기서 각 사용자의 셀 간 간섭을 미리 결정된 간섭 공간으로 정렬시키는 방법을 통해 사용자가 선택된다. 특정한 사용자 스케일링 조건을 만족할 때 기회적 간섭정렬 기술로 최적의 자유도가 달성 가능함이 또한 증명되었다 [3,4,6].

대부분의 현존하는 간섭 정렬 기술들은 간섭을 줄이는데 초점을 맞춘다. 그러나 실제 셀룰러 네트워크의 성능의 지표가 되는 전송률, 전송 지연 시간, 사용자간 형평성 등을 높이려면 자기 신호 세기를 고려하는 것이 중요하다. 최근 single-input single-output (SISO) 상향링크 네트워크에서 임계값 기반의 사용자 스케줄링 알고리즘이 제안되었다. 여기서 각 기지국은 각 사용자가 기지국으로 발생시키는 간섭의 양이 특정 임계값보다 낮은 사용자 중에서 자기 신호 세기가 가장 큰 사용자를 선택한다[8]. 유사한 방식으로 다중 안테나 상향링크 네트워크에서 초기의 기회적 간섭 정렬 기술의 전송률을 향상시키는 기술이 제안되었다[9]. 그러나 전력 제어는 셀룰러 네트워크의 간섭 관리를 위해 중요한 역할을 함에도 불구하고 앞서 [8, 9]의 기술은 전력 제어를 고려하지 않았다.

[10, 11]에서는 통신 시스템에서 간섭인지 기반의 전력제어를 이용한 기술을 제안하였다. [10]에서는 고밀도의 무선 네트워크에서 사용자의 송신 전력 알고리즘 제안하고 이 알고리즘을 이용하여 전체 네트워크 용량이 향상됨을 보였다. [11]에서는 중계기를 이용한 다중 셀 네트워크에서 간섭인지 기반의 전력 제어 알고리즘

을 제안하였다. 이 알고리즘은 기존의 최적의 전력 할당 알고리즘에 비해 낮은 복잡도로 전력 할당이 가능하다. 다중 셀 기반의 다중 안테나 셀룰라 네트워크에서는 사용자의 전력제어 뿐 아니라 빔포밍 기술을 고려해야 한다.

본 논문에서는 다중 셀 기반의 다중안테나 상향링크 네트워크에서 사용자가 인접 셀에 미치는 간섭의 양을 기반으로 사용자의 송신 전력을 제어하고 사용자를 분산적으로 선택하는 스케줄링 방식을 제안한다. 각 사용자는 특이값 분해 (singular value decomposition, SVD)를 통해 인접 셀로 발생시키는 간섭의 양을 최소화시키는 송신 빔포밍 벡터를 결정한다. 그리고 기지국은 사용자 스케줄링시 [8, 9]의 기술처럼 사용자의 발생 간섭이 특정 임계값을 넘으면 사용자를 제외시키지 않고 자기 송신 전력을 조절하여 인접 셀로 미치는 간섭의 양을 줄인다. 따라서 모든 사용자가 상향링크 전송을 위해 선택될 수 있고 기지국은 사용자의 조절된 전력을 포함하여 가장 큰 유효 채널 이득을 갖는 사용자를 선택한다.

최근 [12]에서 유사한 분산 스케줄링 알고리즘이 제안되었으나 [12]에서는 사용자에 안테나가 1개인 상황만을 고려하였다. 본 논문에서는 [12]의 제안 기술을 MIMO 환경으로 확장한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장은 시스템 모델 및 채널 모델에 대해 소개하고 제 3장은 제안한 간섭인지 및 전력제어 스케줄링 기법을 소개한다. 제 4장은 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보여준다. 제 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 실제적인 셀룰러 네트워크를 비교적 잘 묘사하는 시분할 간섭 다중 접속 채널 모델을 고려한다[6]. 전체 네트워크에는  $K$  셀이 존재하고 각 셀의 기지국은  $M$  개의 수신 안테나를 가지고, 각 사용자는  $L$ 개의 송신 안테나를 가진다. 그림 1에서는  $K=2, N=3, M=3, L=2, S=2$ 인 경우의 multi-input multi-output interfering multiple access channel (MIMO IMAC) 모델을 나타낸다. 여기서 각 기지국은 해당 셀의 사용자의 통신에만 관여한다.

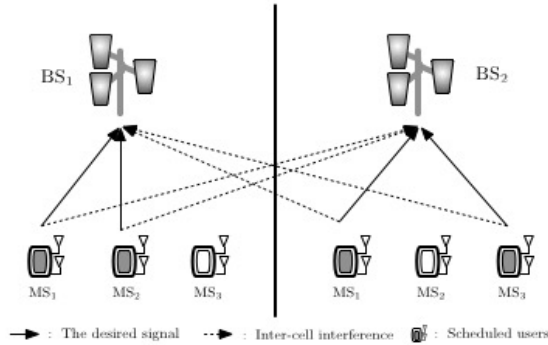


그림 1.  $K=2, N=3, M=3, L=2, S=2$ 일 때 MIMO IMAC 모델

Fig. 1 MIMO IMAC model where  $K=2, N=3, M=3, L=2$ , and  $S=2$ .

전송 블록 동안 채널 행렬이 일정한 값을 가지는 블록 페이딩을 가정하고 모든 전송 블록 간에 독립적으로 변함을 가정한다. 표기상의 편의를 위해 각 셀에서 선택된 사용자의 인덱스를  $(1, \dots, S)$ 로 나타낸다.  $i$ 번째 기지국에서 수신된 신호 벡터  $y_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$y_i = \sum_{j=1}^S \sqrt{P^{[i,j]}} \mathbf{h}_i^{[i,j]} \mathbf{w}^{[i,j]} x^{[i,j]} + \sum_{k=1, k \neq j}^K \sum_{j=1}^S \sqrt{P^{[k,j]}} \mathbf{h}_i^{[k,j]} \mathbf{w}^{[k,j]} x^{[k,j]} + \mathbf{z}_i, \quad (1)$$

여기서  $P^{[i,j]} (\leq P)$ 와  $x^{[i,j]}$ 는  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사용자의 전력과 심볼을 각각 나타내고,  $P$ 는 사용자의 최대 송신 전력이다. 그리고  $j \in \mathcal{N} \triangleq \{1, \dots, N\}$  이고  $i, k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, \dots, K\}$ 이다. 이전에 언급했듯이  $S$ 는 상향 링크 데이터 전송을 위해서 각 셀에서 선택된 사용자 수를 나타낸다. 즉,  $S \in \{1, \dots, M\}$ 이다.  $\mathbf{h}_k^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 는  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사용자와  $k$ 번째 기지국간의 채널 벡터를 나타낸다. 여기서 채널 벡터의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 가지며,  $i, j, k$  간의 서로 독립임을 가정한다. 시분할 상호 호환성 특성으로 각 사용자는 기지국으로부터 받은 파일럿 신호를 통해 인접 셀 기지국으로의 상향링크 채널  $\mathbf{h}_k^{[i,j]}$ 을 정확히 측정할 수 있다.  $\mathbf{w}^{[i,j]}$ 는  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사

용자의 unit-norm 가중 벡터로 정의된다.

즉,  $\|\mathbf{w}^{[i,j]}\| = 1$ 이다.  $\mathbf{z}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 평균이 0이고 공분산이  $N_0 \mathbf{I}_M$ 인 순환적 대칭 복소 백색 가우시안 잡음으로 가정한다. 즉,  $\mathbf{z}_i \sim (0, N_0 \mathbf{I}_M)$ 이다. 여기서  $N_0$ 는 잡음의 스펙트럴 밀도이다. 또한  $\mathbb{E}[|x^{[i,j]}|^2] = 1$ 로 가정하고, 신호 대 잡음 비(SNR)는  $P/N_0$ 로 가정한다. 본 시스템 모델에서 주목해야 할 부분으로 기지국간의 정보 교환이나 기지국 간의 협력은 이루어지지 않는다.

### III. 제안한 간섭인지 기반 전력제어를 이용한 사용자 스케줄링

먼저 제안한 분산 스케줄링 기술의 전체적인 절차에 대해 설명한다.

#### 3.1. 초기화 (기준 신호 및 간섭 임계값 전송)

각 기지국은 해당 셀뿐만 아니라 인접 셀에 있는 사용자에게 무선 채널 정보를 알려 주기 위해 미리 결정된 참조 신호를 전송한다. 그래서 각 사용자는 기준 신호를 알고 있고 채널 정보를 완벽히 측정할 수 있다고 가정한다. 또한 각 기지국은 사용자 스케줄링의 기준이 되는 인접 셀 간섭의 임계값 파라미터  $\eta_I$ 를 미리 결정하여 각 사용자에게 전송한다. 여기서 임계값이란 사용자가 인접 기지국으로 최대 허용할 수 있는 발생 간섭의 양이고 양의 값을 가진다. 이것은  $P$ 에 의해 정규화 된다.

#### 3.2. 단계 1 (최적의 송신 빔포밍 벡터 생성 및 간섭 인지 전력 제어와 스케줄링)

각 사용자는 기지국의 파일럿 신호를 통해 정확한 채널 정보를 측정하여 사용자 자신이 인접 기지국으로 발생시키는 간섭의 양을 측정할 수 있다. 그래서  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사용자가  $k$ 번째 기지국으로 발생시키는 간섭의 양  $\eta_k^{[i,j]}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_k^{[i,j]} = \|\mathbf{h}_k^{[i,j]} \mathbf{w}^{[i,j]}\|^2, \quad (2)$$

여기서  $i \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K} / i = \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, K\}$ 이다. 그런 후에  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사용자의 발생 간섭

의 총 합은 다음과 같이 주어진다.

$$\eta^{[i,j]} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \|\eta_k^{[i,j]}\|^2. \quad (3)$$

그리고 발생 간섭을 최소화하기 위해서, 각 사용자는 특이값 분해를 이용하여 발생 간섭의 가중 벡터를 찾는다. 먼저 사용자의 간섭 채널  $\mathbf{G}^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{(M-1)S \times L}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{G}^{[i,j]} \triangleq [(\mathbf{h}_1^{[i,j]})^T, \dots, (\mathbf{h}_{i-1}^{[i,j]})^T, (\mathbf{h}_{i+1}^{[i,j]})^T, \dots, (\mathbf{h}_K^{[i,j]})^T]^T, \quad (4)$$

더 나아가서 정의된 간섭 채널의 특이값 분해는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{G}^{[i,j]} = \mathbf{\Omega}^{[i,j]} \mathbf{\Sigma}^{[i,j]} \mathbf{V}^{[i,j]H}, \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{\Omega}^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{(K-1)S \times L}$ 과  $\mathbf{V}^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{L \times L}$  벡터는 직교 정규 열로 구성되고,  $\mathbf{\Sigma}^{[i,j]} = \text{diag}(\sigma_1^{[i,j]}, \dots, \sigma_L^{[i,j]})$ 이며,  $\sigma_1^{[i,j]} \geq \dots \geq \sigma_L^{[i,j]}$ 인 특성을 가진다. 이제  $\eta^{[i,j]}$ 를 최소화하는 가중 벡터는 다음의 수식을 이용하여 찾는다.

$$\mathbf{w}^{[i,j]} = \underset{v}{\text{argmin}} \eta^{[i,j]} = \mathbf{v}_L^{[i,j]}. \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{v}_L^{[i,j]}$ 는  $\mathbf{V}^{[i,j]}$  벡터의  $L$ 번째 열이다. 제안한 스케줄링에서  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사용자의 송신 전력은 다음과 같이 결정된다.

$$P^{[i,j]} = \begin{cases} P & \text{if } \eta^{[i,j]} \leq \eta_I \\ \frac{\eta_I}{\eta^{[i,j]}} \cdot P & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $\eta_I$ 는 미리 결정된 최대 허용 가능한 간섭의 임계값이다. 이러한 전력 제어 기술에서 각 사용자는 자신의 인접 셀로 발생시키는 간섭이 임계값보다 작으면 기존의 전력을 사용하고 그렇지 않다면 발생 간섭과 임계값의 비율만큼 자신의 전력을 낮추게 된다. 이렇듯 각 사용자는 발생 간섭의 양에 따라서 자기 전력을 조절 하게 된다. 또한, 제안한 스케줄링에서 사용자의 송신 전력은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$P^{[i,j]} = \min \left\{ P, \frac{\eta_I}{\eta^{[i,j]}} \cdot P \right\}. \quad (8)$$

이러한 송신 전력을 기반으로  $i$ 번째 셀에  $j$ 번째 사용자의 유효 자기 채널 이득은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho^{[i,j]} \triangleq P^{[i,j]} \cdot \|\mathbf{h}_i^{[i,j]}\|^2, \quad (9)$$

이렇게 계산된 사용자의 유효 채널 이득은 통신 중인 기지국으로 피드백되고 스케줄링 매트릭스에 포함된다.

### 3.3. 단계 2 (사용자 선택)

기지국은 통신 중인 셀에서 사용자  $N$ 명의 스케줄링 매트릭스를 받으면 유효 채널 이득이 가장 큰 사용자  $S$ 명을 선택한다. 다시 한 번 강조하여, 일반성을 잃지 않고 사용자  $j$  ( $j = 1, \dots, S$ )는 가장 큰 스케줄링 매트릭스를 가진다고 가정하고 각 셀에서 선택된다.

### 3.4. 단계 3 (상향링크 통신 및 수신 처리)

각 셀에서 선택된  $S$ 명의 사용자는 통신 중인 해당 기지국으로 유효 채널 이득을 보낸다면 수식 (1)과 같이 표현된다. 기지국에서는 선형 zero-forcing 기법을 이용하여 해당 셀 내의 사용자간의 간섭을 제거한다. 그리고  $i$ 번째 기지국은 다음과 같이 병렬 복호화를 위해 충분한 통계량을 얻는다.

$$\mathbf{r}_i = [r_{i,1}, \dots, r_{i,S}]^T \triangleq \mathbf{H}_i^{\#} \mathbf{y}_i, \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{H}_i^{\#} \in \mathbb{C}^{S \times M}$ 는  $H_i$ 의 pseudo-inverse이고,  $\mathbf{H}_i^{\#}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{H}_i^{\#} = [\mathbf{f}_{i,1}^T, \mathbf{f}_{i,2}^T, \dots, \mathbf{f}_{i,S}^T]^T = (\mathbf{H}_i^H \cdot \mathbf{H}_i)^{-1} \mathbf{H}_i^H, \quad (11)$$

여기서  $\mathbf{f}_{i,j} \in \mathbb{C}^{S \times S}$ 는  $\mathbf{H}_i^{\#}$ 의  $j$ 번째 열을 나타내고  $\mathbf{H}_i$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_i = [\mathbf{h}_i^{[i,1]} \mathbf{w}^{[i,1]}, \dots, \mathbf{h}_i^{[i,S]} \mathbf{w}^{[i,S]}]. \quad (12)$$

### 3.5. 단계 4 (전송률 계산)

수식 (10)로부터  $j$ 번째 공간 스트림의 수신 신호  $r_{i,j}$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$r_{i,j} = \sqrt{P^{[i,j]}} x^{[i,j]} + \sum_{k=1, k \neq m}^K \sum_{m=1}^S \mathbf{f}_{i,j} \cdot \sqrt{P^{[k,m]}} \mathbf{h}_i^{[k,m]} \mathbf{w}^{[k,m]} x^{[k,m]} + \mathbf{f}_{i,j} \mathbf{z}_i, \quad (13)$$

따라서 전송률  $R^{[i,j]}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$R^{[i,j]} = \log(1 + \text{SINR}^{[i,j]}) = \log\left(1 + \frac{P^{[i,j]}}{\|\mathbf{f}_{i,j}\|^2 \cdot N_0 + I_{i,j}}\right), \quad (14)$$

여기서  $\text{SINR}^{[i,j]}$ 는  $i$ 번째 셀에 있는  $j$ 번째 사용자의 신호 대 간섭 및 잡음비를 나타내고,  $I_{i,j}$ 는 해당 기지국으로 수신된 간섭의 총합을 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$I_{i,j} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{m=1}^S P^{[k,m]} |\mathbf{f}_{i,j} \cdot \mathbf{h}_i^{[k,m]} \mathbf{w}^{[k,m]}|^2. \quad (15)$$

## IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 다중 셀 기반의 다중안테나 상향링크 네트워크에서 제안한 간섭인지 및 전력제어 기술을 이용한 분산 스케줄링의 성능을 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 공정한 비교를 위해서 기존의 스케줄링 기술 및 제안한 기술은 분산적 방법으로 동작하도록 하고, 기지국 간의 어떠한 정보 교환도 요구하지 않는다. 그리고 셀의 수( $K=3$ ), 기지국 안테나 수( $M=4$ ), 사용자 안테나 수( $L=2,4$ ), 선택된 사용자의 수( $S=2,3$ ), 그리고 사용자 수( $N=40$ )를 고려하였다. 제안된 기법은 maximize signal-to-noise ratio (MaxSNR), minimize interference-to-noise ratio (MinINR), threshold-based opportunistic interference alignment (TOIA) 와 비교되었다[9]. 여기서 MaxSNR 스케줄링 알고리즘은 인접 셀 간의 상호 간섭은 전혀 고려하지 않고 오직 각 사용자의 신호 세기 성분이 가

장 큰 사용자를 선택하는 방법이고, MinINR 스케줄링 알고리즘은 원하는 사용자의 신호 세기 성분은 고려하지 않고 오직 인접 셀로 발생시키는 간섭이 가장 작은 사용자를 선택하는 방법이다. 그리고 TOIA 스케줄링 알고리즘은 각 사용자의 leakage of interference (LIF) 양을 측정하여 미리 결정된 임계값보다 작으면서 신호의 크기가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 여기서 발생 간섭에 대한 미리 결정된 임계값은 전송률 성능 영향을 미치므로 데이터 전송 전에 신중히 결정된다. 그림 2는  $K=3, M=4, L=4, S=3, N=40, \text{SNR}=15\text{dB}$ 인 경우에서 미리 결정된 임계값에 따른 TDUS와 제안한 기술의 전송률 성능을 나타낸다.

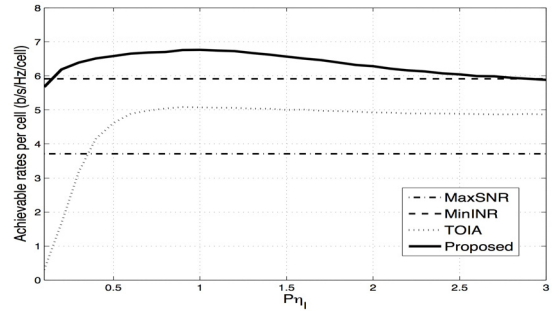


그림 2.  $K=3, M=4, L=4, S=3, N=40, \text{SNR}=15\text{dB}$  일 때 상향링크 다중안테나 네트워크의 임계값  $\eta_l$ 에 따른 데이터 전송률

Fig. 2 Sum-rates of the proposed algorithm in uplink MIMO networks for varying a pre-determined threshold of generating interference  $\eta_l$ , when  $K=3, M=4, L=4, S=3, N=40$ , and  $\text{SNR}=15\text{dB}$

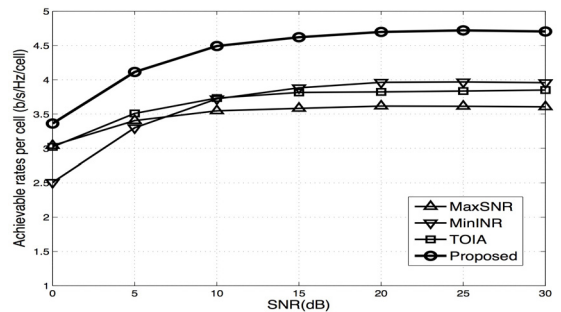


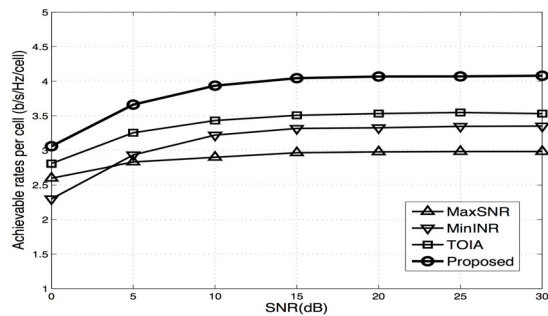
그림 3.  $K=3, M=4, L=2, S=2, N=40$ 일 때 상향링크 다중안테나 네트워크의 SNR에 따른 데이터 전송률

Fig. 3 Sum-rates versus SNR for varying SNR when  $K=3, M=4, L=2, S=2$ , and  $N=40$

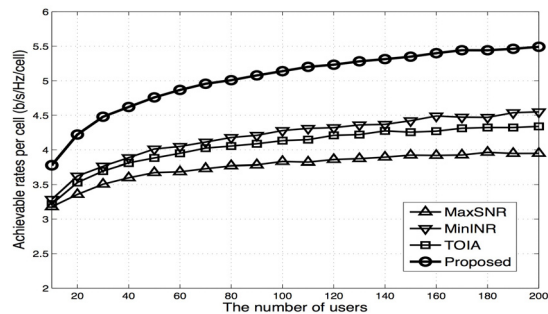
앞서 언급했듯이  $\eta_I$ 에 따라 전송률 성능이 변함을 확인할 수 있고, 최적의 임계값을 찾을 수 있다.

그림 3과 그림 4는  $K=3, M=4, L=2, S=2, 3, N=40$ 인 경우에 SNR이 변함에 따른 기존의 기술 및 제안한 기술의 전송률 성능을 나타낸다. 제안한 기술은 주어진 SNR 영역에서 항상 다른 기술에 비해 월등한 데이터 전송률을 나타내고 있다. 그리고 선택된 사용자의 수  $S$ 에 따라 전송률 성능이 변할 수 있으므로 사용자 선택할 시 신중히 고려되어야 한다.

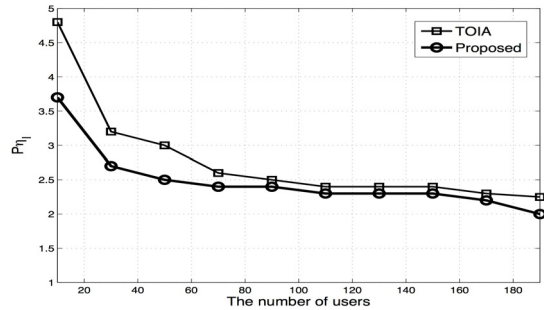
사용자에 수에 따른 데이터 전송률 성능은 그림 5에서 나타내고  $K=3, M=4, L=2, S=2, SNR=15dB$ 인 경우이다. 여기서 사용자가 증가함에 따라 다중 사용자 다이버시티로 인해 모든 기술의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.



**그림 4.**  $K=3, M=4, L=2, S=3, N=40$ 일 때 상향링크 다중안테나 네트워크의 SNR에 따른 데이터 전송률.  
**Fig. 4** Sum-rates versus SNR for varying SNR when  $K=3, M=4, L=2, S=3$ , and  $N=40$ .



**그림 5.**  $K=3, M=4, L=2, S=2, SNR=15dB$ 일 때, 사용자 수에 따른 데이터 전송률  
**Fig. 5** Sum-rate versus the number of users in each cell when  $K=3, M=4, L=2, S=2, SNR=15dB$



**그림 6.**  $K=3, M=4, L=2, S=3, SNR=15dB$ 일 때 TDUS 기술과 제안한 기술의 사용자 수에 따른 최적의 간섭 임계값  $\eta_I$   
**Fig. 6** The optimal  $\eta_I$  of TDUS and the proposed scheme for varying the number of users

그림 6은  $K=3, M=4, L=2, S=3, SNR=15dB$ 일 때 TDUS기술과 제안한 기술의 사용자 수에 따른 최적의 간섭 임계값  $\eta_I$ 를 나타내고, 사용자가 증가할수록 최적의 간섭 임계값  $\eta_I$ 이 낮아진다. 즉, 사용자가 증가함에 따라 발생 간섭이 낮은 사용자가 선택되어 사용자의 인접 셀 발생 간섭의 양이 낮아짐을 의미한다.

## V. 결론

본 논문에서는 다중 셀 기반의 다중안테나 상향링크 네트워크에서 사용자가 인접 셀 기지국에 미치는 간섭의 양을 기반으로 사용자의 송신 전력을 제어하고 사용자들을 분산적으로 스케줄링하는 방식을 제안하였다. 제안된 기법은 기존의 방식들에 비하여 월등히 좋은 데이터 전송률을 달성하는 것을 확인하였다. 또한 제안된 기법은 각 셀에서 분산적으로 동작하므로 실제 이동통신 시스템의 응용 가능성이 높다.

## 감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원금을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A2A10004905).

REFERENCES

[ 1 ] B. C. Jung, D. Park, and W. -Y. Shin, "A Study on the Optimal Degrees-of-Freedom of Uplink Cellular Network: Opportunistic Interference Management," *Asiloma Conference on Signals, Systems, and Computers*, pp. 2067-2071, Nov. 2010.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 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.

[ 4 ] 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.

[ 5 ] 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.

[ 6 ] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, C. Suh, and A. Paulraj, "Opportunistic downlink interference alignment," <http://arxiv.org/pdf/1312.7198v1.pdf>, Dec. 2013.

[ 7 ] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and C. Suh, "Opportunistic interference alignment for interfering broadcasting channels," *IEEE ICASSP*, May 2014.

[ 8 ] 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.

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

[ 10 ] S. Seshan, X. Liu, and P. Steenkiste, "Interference-Aware Transmission Power Control for Dense Wireless Networks", *In Proceedings of the Annual Conference of ITA*, Sep. 2007.

[ 11 ] X. Huang, Y. Mao, F. Wu, and S. Leng, "Interference-aware resource allocation for relay-enhanced multicell networks," *Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2013 International Conference on*, Nov. 2013.

[ 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 (To Appear).



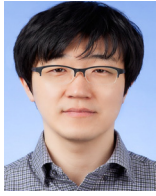
조문제(Moon-Je Cho)

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



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



**정방철(Bang Chul Jung)**

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사  
2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사  
2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사  
2008년 3월 ~ 2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장  
2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 연구교수  
2010년 3월 ~ 2014년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
2014년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수

※관심분야 : 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신, 인지무선통신, 압축센싱