

## 다중 셀 상향링크 네트워크에서 송신전력제어를 이용한 임계값 기반 분산 사용자 스케줄링

조문제 · 반대원 · 정방철\*

### A Threshold-Based Distributed User Scheduling with Transmit Power Control for Uplink Multi-Cell 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 상향링크 네트워크에서 인접 셀에 미치는 간섭의 양을 기반으로 송신 전력이 제어된 사용자를 선택하는 분산적 사용자 스케줄링 방식을 제안한다. 시분할 시스템의 상호 호환성 특성을 이용하여 각 사용자는 인접 기지국으로부터 파일럿 신호를 통하여 채널을 습득하고 데이터 전송 시 인접 셀 기지국들에 미칠 간섭을 각자 계산할 수 있다고 가정한다. 제안된 스케줄링은 각 사용자 단말이 인접 기지국에서 미칠 간섭의 양이 미리 결정된 임계값보다 클 경우 자신의 송신 전력을 낮추는 전력 제어 알고리즘이다. 제안된 기법의 상향링크 데이터 전송률은 기존에 제안된 다양한 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 interference inflicted to other BSs in multi-cell uplink 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. The amount of generating interference to other BSs will be calculated at each user. Especially, in this paper, we propose the threshold-based transmit power control, in which a user decrease its transmit power if its generating interference to other BSs is larger than a predetermined threshold. Simulation results show that the proposed technique significantly outperforms the existing user scheduling algorithms.

**키워드** : 셀룰라 네트워크, 셀간 간섭, 송신 전력 제어, 사용자 스케줄링

**Key word** : Cellular networks, inter-cell interference, transmit power control, user scheduling

접수일자 : 2014. 10. 08 심사완료일자 : 2014. 10. 27 게재확정일자 : 2014. 11. 05

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

Department of Information and Communication Engineering & Insititue of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong  
650-160, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.11.2607>

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. 서론

최근 스마트폰의 보급으로 인해 셀룰라 이동통신 시스템의 데이터 트래픽이 기하급수적으로 증가하였고 이를 수용하기 위해 동일 지역의 셀 수는 급격히 증가하고 있다. 그리고 송신기와 수신기 모두 다중 안테나를 가져서 무선통신에서 높은 데이터 전송 속도를 낼 수 있는 Multi-input multi-output(MIMO) 기술을 이용하면 무선통신에서 높은 데이터 전송 속도를 낼 수 있게 되지만 간섭의 양도 증가한다. 이에 따라 현재 대부분의 무선통신에서 사용자들의 데이터 서비스를 수용해야 하므로 사용자 혹은 기지국은 극심한 셀 내 간섭과 셀 간 간섭을 겪게 될 것이다.

셀룰러 네트워크의 그러한 간섭 문제를 수학적으로 모사하기 위하여 Wyner 모델이 자주 사용된다[1, 2]. Wyner 모델의 경우 복잡하고 수학적으로 분석하기 어려운 실제 셀룰러 환경에 대해 주목할 만한 통찰력을 주었지만 복잡한 실제 무선 통신 환경에 적합하지 않다고 알려져 있다.

이러한 간섭 문제를 해결하기 위한 기술 중 다중 사용자 다이버시티는 이동통신 시스템에서 각 사용자마다 서로 독립적인 무선채널 특성을 갖는다는 점을 이용하여 특정 시점에 가장 좋은 채널을 갖는 사용자에게 채널을 할당하여 스케줄링 이득을 달성하는 기술이다. 간섭이 없는 단일 셀 환경에서 가장 좋은 채널을 갖는 사용자를 스케줄링 할 때 셀 내 사용자 수( $K$ )가 무한대로 증가할 경우 셀의 전송률 (Throughput)은  $\log\log K$ 로 스케일링 된다고 알려져 있다[3]. 다중 사용자 환경에서 Shannon의 정보이론적 용량 관점의 최적의 통신 방식은 현재까지 알려지지 않았다. 최근, 근본적으로 간섭 문제를 해결하는 방법 중 하나로 간섭 정렬(IA) 기술이 Cadambe와 Jafar에 의해 제안되었다[4]. 간섭 정렬기법을 사용할 경우 시변 채널 계수를 갖는  $K$ 명의 사용자 간섭 채널에서 최적의 자유도를 얻을 수 있다고 알려져 있으며, 간섭 정렬 기술은 MIMO 간섭 채널과 셀룰러 네트워크를 포함하는 무선 네트워크 환경에서 활용했을 때 기존 기술 대비 비약적인 전송률 향상이 있음이 증명되었다[5-7].

그러나 간섭이 존재하는 상향링크의 경우, 다중사용자 다이버시티에 관한 문제는 매우 복잡하다. 하향링크의 경우 사용자가 수신단 SINR(Signal to Interference-

plus-Noise Ratio)을 정확히 계산할 수 있지만, 상향링크에서는 인접 셀에서 선택된 사용자의 위치에 따라 주변 셀에 미치는 간섭의 영향이 다르기 때문에 각 사용자는 자신의 채널 외에 다른 사용자의 상향링크 채널을 알 수 없다[5, 6, 8]. 따라서 상향링크에서는 각 셀의 스케줄링에서 인접 셀에 미치는 간섭의 영향도 고려해야만 전체 셀의 전송률이 증가한다.

본 논문에서는 다중 셀 상향링크에서 인접 셀에 미치는 간섭의 양을 기반으로 송신 전력이 제어된 사용자를 선택하는 분산적 스케줄링 방식을 제안한다. 그리고 무선 채널의 상호 호환성 특성을 이용하여 각 사용자는 하향링크 파일럿 신호를 통하여 상향링크에서 데이터 전송 시 인접 셀 기지국들에 미칠 간섭을 계산할 수 있다고 가정한다. 제안된 기술에서 사용자들은 미리 정해진 임계값보다 자신이 미칠 간섭이 클 경우 자신의 송신 전력을 줄인다. 사용자들은 제어된 자신의 전력 정보를 상향링크로 피드백한다. 기지국은 수신된 피드백 정보를 바탕으로 최상의 신호 세기를 갖는 사용자를 선택한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장은 시스템 모델 및 채널 모델을 소개하고 제 3장은 기존의 사용자 스케줄링 기법들을 소개한다. 제 4장에서는 송신 전력 제어 및 임계값 기반 분산적 사용자 스케줄링 방법을 제안하고 제 4장은 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보여준다. 제 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 상향링크 다중 셀 시나리오 중에서 실제적인 셀룰러 네트워크를 가장 잘 묘사하는 Interfering Multiple-Access Channel (IMAC)을 고려한다. 이 모델에서는 각 기지국은 해당 셀 내에 있는 사용자들의 통신에만 관여하며 단일 수신 안테나를 가지고, 각 사용자는 하나의 송신 안테나를 가진다. 전체 네트워크에  $K$ 개의 셀이 존재하고, 각 셀에  $M$ 명의 사용자가 있다고 가정했을 때, 기지국  $i$ 의 수신 신호  $y_i \in \mathbb{C}$ 는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i = \sqrt{P_{u_i}^{(i)}} h_{i,u_i}^{(i)} x_{u_i}^{(i)} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sqrt{P_{u_k}^{(k)}} \beta_{ik} h_{i,u_k}^{(k)} x_{u_k}^{(k)} + z_i \quad (1)$$

여기서  $P_{u_i}^{(i)}$ 는  $i$ 번째 셀에서의 사용자  $u_i$ 의 송신 전력이고  $x_{u_i}^{(i)}$ 는  $i$ 번째 셀에서의 사용자  $u_i$ 가 보낸 신호이다. 기지국  $i$ 에 수신된  $y_i$ 는 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 인 가우시안 잡음  $z_i \in \mathbb{C}$ 에 의하여 왜곡된다. 식 (1)에서  $\beta_{ik} h_{i,u_i}^{(k)} \in \mathbb{C}$ 는  $k$ 번째 셀에 있는 사용자  $u_k$ 와  $i$ 번째 기지국 사이의 채널을 나타낸다. 여기서  $\beta_{ik}$ 는 경로손실을 나타내는 변수로서  $0 < \beta_{ik} \leq 1$ 의 범위를 가지고 본 논문에서는 1로 고정한다.  $h_{i,u_k}^{(k)}$ 는 Small-Scale 페이딩을 나타내는 변수이다.

그리고 각 사용자는 하향링크 파일럿 신호를 이용하여 자신의 상향링크 무선 채널  $h_{i,u_i}^{(i)}$ 에 대한 정보를 미리 알 수 있고 각 사용자는 이 정보를 기반으로 제 3장에서 제안할 다양한 스케줄링을 위한 기준 값 (scheduling criterion)을 생성한다.

### III. 기존의 스케줄링 기법들

#### 3.1. 신호 대 간섭비 최대화 기반 스케줄링 (Max-SNR)

Maximize signal-to-noise ratio (Max-SNR) 스케줄링 알고리즘은 인접 셀 간의 상호 간섭은 전혀 고려하지 않고 오직 각 사용자의 신호 세기 성분이 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법을 통하여 선택되는 사용자는 아래 수식으로 결정된다.

$$S_{MaxSNR} = \operatorname{argmax}_i |\sqrt{P} h_{i,u_i}^{(i)}|^2 \quad (2)$$

for  $i = 1, 2, \dots, N$

식 (2)에서는 각 사용자가 동일한 전력을 사용한다고 가정한다.

#### 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 기법을 통하여 선택되는 사용자는 아래의 수식으로 결정된다.

$$S_{MinINR} = \operatorname{argmin}_{u_{i,k=1,k \neq i}} \sum_{k=1,k \neq i}^K |\sqrt{P} h_{k,u_i}^{(i)}|^2 \quad (3)$$

for  $i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K$

식 (3)에서도 각 사용자가 동일한 전력을 사용한다고 가정한다.

#### 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 셀로 생성 간섭비가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법을 통하여 선택되는 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{MaxSGINR} = \operatorname{argmax}_{u_i} \frac{|\sqrt{P} h_{i,u_i}^{(i)}|^2}{1 + \sum_{k=1,k \neq i}^K |\sqrt{P} h_{k,u_i}^{(i)}|^2} \quad (4)$$

for  $i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K$

식 (4)에서도 각 사용자가 동일한 전력을 사용한다고 가정한다.

#### 3.4. 임계치 기반 분산 사용자 스케줄링 (TDUS)

Threshold-Based Distributed User Scheduling (TDUS) 알고리즘은 각 사용자의 신호 중에 3.2절에서 계산한 간섭의 양 (INR)이 미리 결정된 임계치보다 작 으면서 신호의 크기가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법 이다 [8]. 이 스케줄링 기법을 통하여 선택되는 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{TDUS}^m = \operatorname{argmax}_n |\sqrt{P} h_{i,u_i}^{(i)}|^2 \quad (5)$$

for  $i = 1, 2, \dots, N$

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

for  $k = 1, 2, \dots, K$

여기서 식 (6)은 인접 셀에 발생시키는 간섭의 양을 미리 결정된 임계값  $\eta_I$ 에 의해 사용자 선택 범위를 제한하는 식이다. 따라서 각 사용자 중 (6)식의 조건을 만족하지 않는 사용자는 스케줄링 후보에서 제외된다. 그러므로 TDUS에서는 미리 결정된 임계값의 결정이 매우 중요하다. 너무 높은 임계값이 설정되면 간섭의 양이 증가하여 효과적인 사용자 선택이 불가능하고, 너무 낮은 임계값이 설정되면 전체 사용자중 임계값 조건을 만족하는 사용자의 수가 줄어 사용자 다이버시티 효과가 줄어든다. TDUS에서 간섭 임계값은 각 파라미터에 따라 exhaustive search를 통해 최적화되며 사용자들의 전력은 고정이라 가정한다.

#### IV. 제안된 전력제어 및 임계값 기반 분산 사용자 스케줄링

3.4절에서 설명한 Threshold-Based Distributed User Scheduling (TDUS)는 각 사용자의 충분히 큰 채널 이득 값을 가지면서 동시에 인접 셀로 충분히 작은 간섭의 양을 발생시키는 사용자를 선택하는 방법이다. 여기서 임계값  $\eta_I$ 는 데이터 전송 전에 미리 결정된 양의 임계값이고, 임계값  $\eta_I$ 을 만족시키는 사용자만 스케줄링 후보가 된다. 따라서 상황에 따라서는 다수의 사용자가 임계값의 조건을 만족하지 않아 스케줄링에서 제외되는 상황이 발생하고 이는 사용자의 수가 적을수록 스케줄링 후보 사용자가 없는 스케줄링 Outage 현상이 더욱 빈번히 발생할 수 있다. 따라서 사용자의 수와 무선 통신 채널 특성에 따라 간섭 임계값은 신중히 결정되어야 한다.

본 논문에서는 이러한 스케줄링 Outage 현상을 근본적으로 없애는 Threshold-Based Distributed User Scheduling with Transmit Power Control (TDUS-PC) 알고리즘을 제안한다. 제안된 송신 전력 제어 알고리즘은 3.4절에서 제안된 (6)식에 기반한 간섭 임계값 조건을 만족하는 사용자는 자신의 최대 전력으로 데이터를 전송하게 하고 만약 (6)식의 조건을 만족하지 못하는 사용자는 자신의 송신 전력을 낮추어 (6)식을 만족하도록 하는 것이다.

따라서 기준 (6)을 만족시키지 못하는 사용자들에게

아래의 식에 따라 전력 조절을 수행한다. 이 스케줄링 기법을 통하여 선택되는 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{TDUS-PC} = \operatorname{argmax}_{u_i} \left| \sqrt{\widetilde{P}_{u_i}^{(i)}} h_{i,u_i}^{(i)} \right|^2 \quad (7)$$

for  $i = 1, 2, \dots, N$

$$\widetilde{P}_{u_i}^{(i)} = \min \left\{ P_{u_i}^{(i)}, \left[ \eta_I / \left( \sum_{k=1, k \neq i}^K \left| \sqrt{P_{u_k}^{(i)}} h_{k,u_i}^{(i)} \right|^2 SNR \right) \right] \right\} \quad (8)$$

여기서 각 사용자는 자신의 채널을 알고 있으므로 각 사용자가 사용할 전력은 기지국의 개입 없이 각 사용자에서 분산적으로 계산된다. 제안된 알고리즘에서도 간섭 임계값은 최적화되어야 한다.

#### V. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제 4 장에서 제안한 송신전력 및 임계값 기반 분산 사용자 스케줄링의 성능을 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 TDUS 알고리즘과 TDUS-PC 알고리즘이 최적의 성능을 갖도록 간섭 임계값  $\eta_I$ 을 최적화하였다. 그림 1과 그림 2는 셀의 수가 3개와 4개인 경우의 셀 당 사용자의 수는 모두 100명인 상황에서 다중 셀 상향링크 시스템에서의 데이터 전송률을 보여주고 있다. 제안된 기법을 기존 기술인 Max-SNR, Min-INR, SGINR, TDUS 와 비교하였다. 그림 1과 그림 2에서 볼 수 있듯이 제안된 TDUS-PC은 주어진 SNR 영역에서 항상 다른 모든 기술에 비해 월등한 데이터 전송율을 나타내고 있고 셀의 수  $K$ 를 증가한 경우에도 다른 모든 기술에 비해 좋은 성능을 보인다. 그리고 그림 3은 각 그림 1과 그림 2의 TDUS, TDUS-PC의 SNR에 따른 최적의 간섭 임계값을 나타내고 SNR이 증가할수록 값이 줄어들고 TDUS-PC에서 사용된 임계값이 기존 TDUS 기법보다 최적의 간섭 임계값이 더 작은 것을 확인 할 수 있다. 여기서 TDUS-PC의 최적의 간섭 임계값이 더 작다는 것은 송신 전력 제어로 인해 인접 셀로 미치는 간섭의 양이 더 작다는 의미가이다.

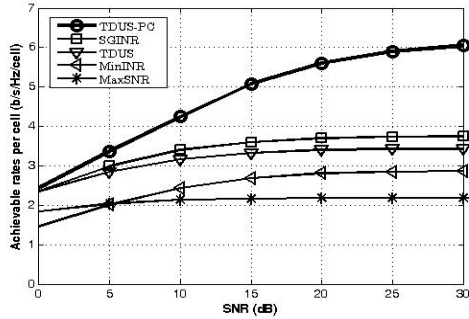


그림 1.  $K=3, N=100$  일 때 다중 셀 상향링크 네트워크의 SNR에 따른 데이터 전송율

Fig. 1 Achievable data rate of the proposed algorithm in uplink multi-cell networks for varying SNRs for  $K=3$  and  $N=100$

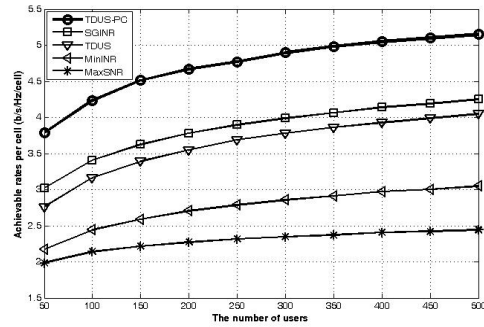


그림 4.  $K=4, SNR=10dB$  일 때 다중 셀 상향링크 네트워크의 사용자 수에 따른 데이터 전송율

Fig. 4 Achievable data rates of the proposed algorithm in multi-cell networks for varying number of users in a cell for  $K=4$  and  $SNR=10dB$

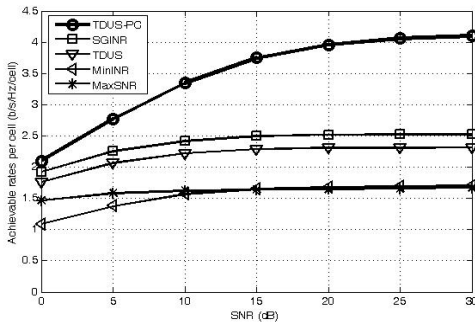


그림 2.  $K=4, N=100$  일 때 다중 셀 상향링크 네트워크의 SNR에 따른 데이터 전송율

Fig. 2 Achievable data rates of the proposed algorithm in uplink multi-cell networks for varying SNRs for  $K=4$  and  $N=100$

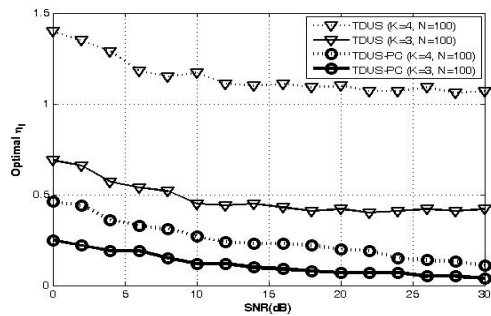


그림 3. 그림 1과 그림 2의 TDUS 기술과 TDUS-PC 기술의 SNR에 최적의 간섭 임계값  $\eta_I$

Fig. 3 The optimal  $\eta_I$  of TDUS and TDUS-PC scheme for varying SNRs in Fig.1 and Fig.2

그림 4는 셀의 수가 3개이고 사용자들의 평균SNR이 10dB 일 때, 셀 내의 사용자 수가 증가함에 따른 데이터 전송율을 보여준다. 다른 기술에 비해서 제안된 기술의 성능이 사용자가 증가할수록 더욱 나은 성능을 보여준다. 이는 제안된 기법이 다른 기술에 비하여 사용자 다이버시티 효과를 더욱 효과적으로 얻는다는 것을 의미한다. 여기서도 마찬가지로 각 사용자의 수에 따라 TDUS, TDUS-PC의 최적의 간섭 임계값이 사용되었다.

## VI. 결론

본 논문에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 인접 셀에 미치는 간섭의 양을 기반으로 송신 전력이 제어된 사용자를 선택하는 분산적 스케줄링 방식을 제안하였다. 제안된 스케줄링 및 송신 전력 제어 기법이 기존의 방식들에 비하여 훨씬 더 좋은 데이터 전송률을 달성하는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A2A1004905).

REFERENCES

- [1] O. Somekh and S. Shamai (Shitz), "Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multi-access channel with fading," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1401 - 1425, Jul. 2000.
- [2] N. Levy and S. Shamai (Shitz), "Information theoretic aspects of users' activity in a Wyner-like cellular model," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 5, pp. 2241 - 2248, Jul. 2010.
- [3] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 6, pp.1277 - 1294, Aug. 2002.
- [4] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425 - 3441, Aug. 2008.
- [5] B. C. Jung and W. -Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular uplink," *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 148-150, Feb. 2011.
- [6] 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. on Communications*, vol. 60, no. 7, pp. 1935-1944, Jul. 2012.
- [7] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 2180-2192, May 2013.
- [8] W.-Y. Shin, D. Park, and B. C. Jung, "Can One Achieve Multiuser Diversity in Uplink Multi-cell Networks?," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 60, No. 12, pp. 3535-3540, Dec. 2012.



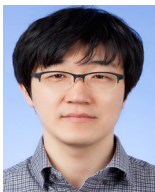
조문제(Moon-Je Cho)

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 IT융합연구소 팀장  
 2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT융합연구소 연구교수  
 2010년 3월 ~ 2014년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
 2010년 4월 ~ 현재 KAIST IT융합연구소 겸임교수  
 2014년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수  
 ※관심분야 : 무선통신, 통신신호처리, 압축센싱, 정보이론