

상향링크 공간 분할 다중 접속 시스템에서 사용자 스케줄링, 송신 전력 제어, 수신 빔포밍에 관하여

조문제¹ · 반태원² · 정방철^{3*}

A Study on the Uplink SDMA Systems: User Scheduling, Transmit Power Control, and Receive Beamforming

Moon-Je Cho¹ · Tae-Won Ban² · Bang Chul Jung^{3*}

¹Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

요 약

본 논문은 상향링크 공간분할접속 시스템에서 사용자 스케줄링, 전력제어, 수신 빔포밍을 다룬다. 사용자는 단일 안테나를 가지며 기지국은 다중 안테나를 가진다고 가정한다. 기지국에서는 미리 약속된 방식으로 수신 빔포밍을 수행하고 빔포밍 후의 정해진 스케줄링 방식에 따라 사용자가 선택된다. 본 논문에서는 사용자가 각자 자신이 다른 사용자의 신호에 미칠 간섭을 미리 계산하여 그 값이 특정 임계치보다 클 경우 자신의 송신 전력을 낮추는 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 기술의 상향링크 데이터 전송률은 기존에 제안된 다양한 사용자 스케줄링 알고리즘들에 비하여 월등히 좋은 성능을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we investigate the user scheduling, transmit beamforming, and receive beamforming of uplink space division multiple access (SDMA) systems where multiple users are allowed to transmit their signal to a base station (BS) using the same frequency band simultaneously. The BS performs a receive beamforming using the predetermined pseudo-random pattern and select users with a specific criterion. Especially, in this paper, we propose the threshold-based transmit power control, in which a user decrease its transmit power according if its generating interference to other users's signal is larger than a predetermined threshold. Assuming that the TDD system is used, the channel state information (CSI) can be obtained at each user from pilot signals from the BS. Simulation results show that the proposed technique significantly outperforms the existing user scheduling algorithms.

키워드 : 다중안테나, 셀룰라 네트워크, 빔포밍, 전력 제어, 사용자 스케줄링

Key word : MIMO, cellular networks, beamforming, power control, user scheduling

접수일자 : 2013. 11. 17 심사완료일자 : 2013. 11. 21 게재확정일자 : 2013. 12. 08

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

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

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.2.289>

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

Multi-input multi-output(MIMO)는 송신기와 수신기 모두 다중 안테나를 가져서 무선통신에서 높은 데이터 전송 속도를 낼 수 있다. 그리고 현재의 셀룰러 네트워크를 포함한 대부분의 무선통신에서는 하나의 기지국에 다수의 사용자들의 데이터 서비스를 수용해야 하고 미래에는 더 많은 서비스들을 수용해야 할 것이다. 이러한 다중 사용자 환경에서 각 모바일 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 대한 주목할 만한 통찰력을 주었지만 복잡한 실제 무선 통신 환경에 적합하지 않다고 알려져 있다.

다중 사용자 환경에서 Shannon의 정보이론적 용량 관점에서 최적의 통신 방식은 현재까지 알려지지 않았다. 최근, 근본적으로 간섭 문제를 해결하는 방법 중 하나로 간섭 정렬(IA) 기술이 Cadambe와 Jafar에 의해 제안되었다[3]. 간섭 정렬기법을 사용할 경우 시변 채널 계수를 갖는 K명의 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[4-6].

한편, 단일 셀 하향링크에서 페이딩의 특성을 이용한 주목할 만한 방법으로 기회주의적 스케줄링, 기회주의적 빔포밍, 랜덤 빔포밍 등의 기술들이 제안되었다 [7][8]. 위 기술들을 사용하면 단일 셀에서 사용자 전송률이 최적 스케일링을 성취할 수 있다는 것이 증명되었다. 기지국은 정해진 패턴의 송신 빔포밍 패턴을 변화시키고 사용자는 수신 신호 대 간섭 및 잡음 비(signal-to-interference-and-noise ratio, SINR)를 계산하고 그 값을 피드백한다. 기지국에서는 사용자들 중 피드백 값이 가장 큰 사용자를 선택한다. 그러나 셀룰러 시스템에서 상향링크는 근본적으로 하향링크 환경과 다르다. 하향링크의 경우 사용자가 다중 빔 간의 수신단 SINR을 정확히 계산할 수 있지만, 상향링크에서는 각 사용자는 자신의 채널 외에 다른 사용자의 상향링크 채널을 알 수 없다[9]. 따라서 다중 사용자들이 서로 기지국에서 미치는

간섭의 양을 알 수 없고 최적의 다중사용자 이득을 얻는 사용자 스케줄링 방법이 아직 제안되지 않았다.

본 논문에서는 수신단 랜덤 빔포밍과 함께 전력이 조절된 임계값 기반 분산 기회주의적 스케줄링을 제안한다. 제안된 기술에서 기지국은 기존에 하향링크에서 제안되었던 송신단 랜덤 빔포밍 기술[8]을 수신단에서 그대로 적용한다. 사용자들은 수신단 랜덤 빔포밍에 관한 정보를 바탕으로 자신이 사용할 수신단 빔을 선택하고 자신이 다른 사용자의 신호에 미칠 간섭을 정확히 계산할 수 있다. 제안된 기술에서 사용자들은 미리 정해진 임계값보다 자신이 미칠 간섭이 클 경우 자신의 송신 전력을 줄인다. 사용자들은 제어된 자신의 전력 정보와 자신이 사용할 빔의 번호를 상향링크로 피드백한다. 기지국은 수신된 피드백 정보를 바탕으로 최상의 신호 세기를 갖는 사용자를 빔별로 선택한다. 본 논문에서는 시분할 Duplex (TDD) 시스템을 가정한다. 따라서 각 사용자는 하향링크 파일럿 신호를 통하여 상향링크 채널의 특성을 파악할 수 있다.

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

II. 시스템 모델

본 논문에서는 이론적으로 다중 안테나 multiple-access channel (MIMO-MAC)를 고려한다. 이 모델에서는 하나의 셀에 M개의 안테나를 가진 기지국이 있고, 셀 내에 N 명이 있다고 가정한다. 또한 각 사용자는 단일 안테나를 가진다고 가정한다. 따라서, 각 사용자별 기저대역 상향링크 채널은 single-input multiple-output (SIMO) MAC으로 모델링 할 수 있다. 여기서 N이 M보다 훨씬 크다면 무선 채널의 무작위성 (randomness) 이 용하여 기회주의적 이득을 얻을 수 있다.

전송 블록(프레임) 동안 채널 벡터가 상수인 블록 페이딩 채널 모델을 가정하면 블록 단위로 채널 기간과 채널 코딩을 구성할 수 있고 모든 전송 블록들이 독립적으로 변하게 된다. 기지국은 M개의 안테나를 가지고

최대 M 명의 사용자 신호를 받을 수 있는데, 이 때 수신단 랜덤 빔포밍을 위해 $M \times M$ 크기의 빔포밍 행렬 \mathbf{U} 이 사용된다. 기지국에서 받은 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$ 는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sum_{n=1}^M \mathbf{h}_n \sqrt{P_n} x_n + \mathbf{z} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M] \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}\mathbf{y} \quad (3)$$

여기서 (1)에서 $x_n \in \mathbb{C}$ 는 n 번째 사용자로부터 전송된 신호를 나타내고 각 사용자는 송신전력 P_n 를 갖는다. $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 평균이 0이고 $N_0 \mathbf{I}_M$ 의 공분산 매트릭스를 갖는 독립적이고 동일한 분포의 순환적 대칭인 복소수 AWGN 벡터이다. $\mathbf{h}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 n 번째 사용자로부터 기지국까지의 상향링크 채널 벡터이고 각 원소는 Rayleigh 분포를 가정한다. (2)는 기지국에서 수신 안테나 수 M 에 따른 $M \times M$ 크기의 랜덤 빔포밍 벡터 \mathbf{U} 이 생성되고 이는 $\mathbf{u}_m \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 의 원소로 이루어져 있다. ($m = 1, 2, \dots, M$). (3)는 기지국에서 받은 신호를 랜덤 빔포밍 행렬 \mathbf{U} 를 이용하여 선택된 M 명의 수신 신호 벡터가 변형된다.

그리고 각 사용자는 하향링크 파일럿 신호를 이용하여 자신의 상향링크 무선 채널 \mathbf{h}_n 에 대한 정보를 미리 알 수 있고 수신단에서 수행되는 랜덤 빔포밍 행렬 \mathbf{U} 에 대한 정보도 이미 알 수 있다. 각 사용자는 이 정보를 기반으로 제 3장에서 제안할 다양한 스케줄링을 위한 기준 값 (scheduling criterion)을 생성한다.

III. 기존의 스케줄링 기법들

3.1. SNR 최대화 기반 스케줄링 (Max-SNR)

Max-SNR은 사용자간 상호 간섭은 전혀 고려하지 않고 오직 각 사용자의 신호 세기 성분이 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법을 통하여 m 번째 수신 빔을 사용할 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{MaxSNR}^m = \operatorname{argmax}_n |\sqrt{P} \mathbf{u}_m^T \mathbf{h}_n|^2 \quad (4)$$

$$\text{for } n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M$$

각 사용자는 수신단에서 사용될 빔 M 개에 해당하는 신호의 크기를 모두 피드백한다. (4)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 각 사용자가 발생시키는 다른 신호에 미치는 간섭이 가장 작은 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법을 통하여 m 번째 수신 빔을 사용할 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{MinINR}^m = \operatorname{argmin}_n \sum_{j=1, j \neq m}^M |\sqrt{P} \mathbf{u}_j^T \mathbf{h}_n|^2 \quad (5)$$

$$\text{for } n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M$$

각 사용자는 수신단에서 사용될 빔 M 개에 해당하는 간섭의 크기를 모두 피드백한다. (5)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 수신 빔당 사용자의 신호 대 생성 간섭비가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다. 이 스케줄링 기법을 통하여 m 번째 수신 빔을 사용할 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{MaxSGINR}^m = \quad (6)$$

$$\operatorname{argmax}_n \frac{|\sqrt{P} \mathbf{u}_m^T \mathbf{h}_n|^2}{1 + \sum_{j=1, j \neq m}^M |\sqrt{P} \mathbf{u}_j^T \mathbf{h}_n|^2}$$

$$\text{for } n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M$$

각 사용자는 수신단에서 사용될 빔 M 개에 해당하는

간섭의 크기를 모두 피드백한다. (6)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 3.2에서 계산한 간섭의 양 (INR)이 미리 결정된 임계치보다 작으면서 신호의 크기가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다[9]. 이 스케줄링 기법을 통하여 m번째 수신 빔을 사용할 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{TDUS}^m = \underset{\text{for } n = 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, M}{\operatorname{argmax}_n} |\sqrt{P} \mathbf{u}_n^T \mathbf{h}_n|^2 \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1, j \neq m}^M |\sqrt{P} \mathbf{u}_j^T \mathbf{h}_n|^2 \leq \eta_I \quad (8)$$

여기서 기준 (8)은 임계값 η_I 에 의해 각 사용자가 발생시키는 간섭의 양을 미리 결정된 임계값에 의해 사용자 선택 범위를 제한하는 식이다. 따라서 각 사용자 중 (8)식의 조건을 만족하지 않는 사용자는 스케줄링 후보에서 제외된다. 따라서 TDUS에서는 미리 결정된 간섭임계값의 결정이 매우 중요하다. 너무 높은 간섭임계값이 설정되면 간섭의 양이 증가하여 효과적인 사용자 선택이 불가능하고, 너무 낮은 임계값이 설정되면 전체 사용자중 임계값 조건을 만족하는 사용자의 수가 줄어 사용자 다이버시티 효과가 줄어든다. TDUS에서도 사용자들의 전력은 고정이라 가정한다.

IV. 제안된 전력제어 및 임계값 기반 분산 사용자 스케줄링

3.4절에서 설명한 Threshold-Based Distributed User Scheduling (TDUS)는 M명의 사용자가 특정 수신 빔에 대하여 충분히 큰 채널 이득값을 가지면서 동시에 다른 수신 빔에 대하여는 충분히 작은 간섭의 양의 발생시키는 사용자를 선택하는 방법이다. 여기서 임계값 η_I 는 데이터 전송 전에 미리 결정된 양의 임계값이고, 임계값 η_I 을 만족시키는 사용자만 스케줄링 후보가 된다. 따라

서 상황에 따라서는 다수의 사용자가 임계값을 조건을 만족하지 않아 스케줄링에서 제외되는 상황이 발생하고 이는 사용자의 수가 적을수록 스케줄링할 후보 사용자가 없는 스케줄링 Outage 현상이 더욱 빈번히 발생할 수 있다. 따라서 사용자의 수와 무선 통신 채널 특성에 따라 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 (8)식에 기반한 간섭 임계값 조건을 만족하는 사용자는 자신의 최대 전력으로 데이터를 전송하게 하고 만약 (8)식의 조건을 만족하지 못하는 사용자는 자신의 송신 전력을 낮추어 (8)식을 만족하도록 하는 것이다.

따라서 기준 (8)을 만족시키는 못하는 사용자들에게 아래의 식에 따라 전력 조절을 수행한다. 이 스케줄링 기법을 통하여 m번째 수신 빔을 사용할 사용자는 아래 수식을 통하여 결정된다.

$$S_{TDUS-PC}^m = \underset{\text{for } n = 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, M}{\operatorname{argmax}_n} |\sqrt{P^m} \mathbf{u}_n^T \mathbf{h}_n|^2 \quad (9)$$

$$\tilde{P}^m = \min \left\{ P, \eta_I / \left(\sum_{j=1, j \neq m}^M |\mathbf{u}_j^T \mathbf{h}_n|^2 \right) \right\} \quad (10)$$

여기서 각 사용자별로 사용할 수신 빔에 따라서 송신 전력이 달라질 수 있음에 주목하라. 또한 각 사용자는 자신의 채널을 알고 있으므로 각 사용자가 사용할 전력은 기지국의 개입 없이 각 사용자에서 분산적으로 계산된다. 제안된 알고리즘에서도 간섭관련 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 임계값 η_I

을 최적화하였다. 그림 1과 그림 2는 기지국 수신단 안테나가 4개, 8개인 경우 셀 당 사용자의 수는 모두 100명인 상황에서 상향링크 SDMA 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 일정한 셀 전송율을 나타내고 있고 기지국의 안테나 M 이 증가한 경우에도 다른 모든 기술에 비해 좋은 성능을 보인다.

그림 3은 기지국 안테나가 4개이고 사용자들의 평균 SNR이 20dB 일 때, 셀 내의 사용자 수가 증가함에 따른 셀 전송율을 보여준다.

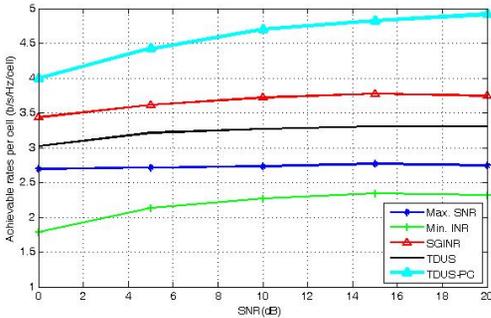


그림 1. $M=4, N=100$ 일 때 상향링크 SDMA 시스템의 SNR에 따른 데이터 전송율

Fig. 1 Achievable data rate of the proposed algorithm in uplink SDMA systems for varying SNRs for $M=4$ and $N=100$.

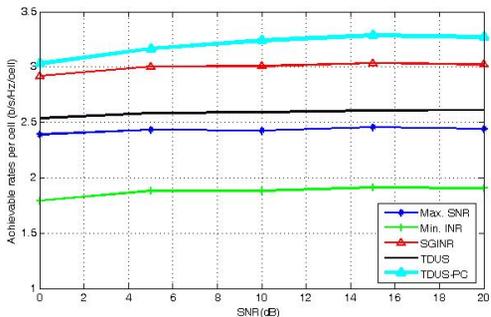


그림 2. $M=8, N=100$ 일 때 상향링크 SDMA 시스템의 SNR에 따른 데이터 전송율

Fig. 2 Achievable data rates of the proposed algorithm in uplink SDMA systems for varying SNRs for $M=8$ and $N=100$.

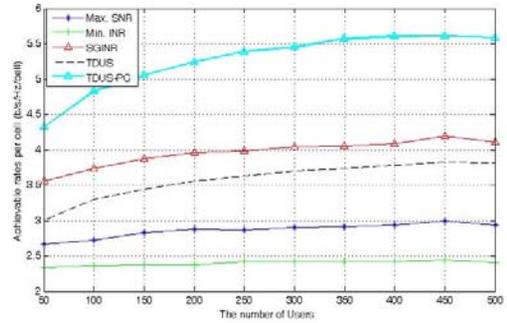


그림 3. $M=4, SNR=20dB$ 일 때 상향링크 SDMA 시스템의 사용자 수에 따른 데이터 전송율

Fig. 3 Achievable data rates of the proposed algorithm in uplink SDMA systems for varying number of users in a cell for $M=4$ and $SNR=20dB$.

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 최적의 임계치 값이 사용되었다. TDUS 기법의 경우와 TDUS-PC에서 사용된 최적 임계치 값은 다르다.

VI. 결론

본 논문에서는 상향링크 SDMA 시스템에서 사용자 스케줄링, 수신 빔포밍, 송신 전력 제어 기법에 관하여 논하였다. 제안된 스케줄링 및 송신 전력 제어 기법이 기존의 방식들에 비하여 훨씬 더 좋은 데이터 전송률을 달성하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 미래부가 지원한 2013년 정보통신-방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음.

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] 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.

[4] 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.

[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. on Communications*, 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. on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 2180-2192, May 2013.

[7] 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.

[8] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 506 - 522, Feb. 2005.

[9] 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.



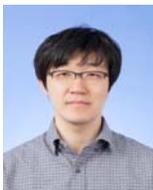
조문제(Moon-Je Cho)

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 IT 융합연구소 팀장
 2009년 9월~2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 연구교수
 2010년 3월~현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
 ※관심분야: 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신, 인지무선통신, 압축센싱