

다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크에서의 사용자 및 안테나 선택 기법

반태원 · 정무웅 · 정방철*

User and Antenna Joint Selection Scheme in Multiple User Massive MIMO Networks

Tae-Won Ban · Moo-woong Jeong · Bang Chul Jung*

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

요 약

최근 폭발적으로 증가하고 있는 모바일 데이터 트래픽을 효과적으로 서비스하기 위한 기술 중의 하나로 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크가 많은 관심을 받고 있다. 그러나, 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크는 기지국에 복잡한 하드웨어 구성이 필요할 뿐만 아니라 최적의 사용자 조합을 선택하기 위하여 많은 계산량을 유발한다. 본 논문에서는 이러한 하드웨어 복잡도와 사용자 선택 알고리즘의 계산량을 동시에 획기적으로 감소시킬 수 있는 안테나와 사용자 선택 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방식은 $O((N - S_a + 1) \times \min(S_a, K))$ 의 계산 복잡도를 가지며, 이는 Brute-Force 탐색 기반의 최적 방식의 계산 복잡도 $O\left(N C_{S_a} \sum_{i=1}^{\min(S_a, K)} K C_i\right)$ 보다 획기적으로 감소된 것이다. 여기서 N 은 모든 전송안테나의 수, S_a 은 선택된 안테나 수, K 는 사용자의 수를 나타낸다.

ABSTRACT

Recently, multi-user massive MIMO (MU-Massive MIMO) network has attracted a lot of attention as a technology to accommodate explosively increasing mobile data traffic. However, the MU-Massive MIMO network causes a tremendous hardware complexity in a base station and computational complexity to select optimal set of users. In this paper, we thus propose a simple algorithm for selecting antennas and users while reducing the hardware and computational complexities simultaneously. The proposed scheme has a computational complexity of $O((N - S_a + 1) \times \min(S_a, K))$, which is significantly reduced compared to the complexity of optimal scheme based on Brute-Force searching, $O\left(N C_{S_a} \sum_{i=1}^{\min(S_a, K)} K C_i\right)$, where N , S_a , and K denote the number of total transmit antennas, the number of selected antennas, and the number of all users, respectively.

키워드 : MIMO, 다중 안테나&사용자 네트워크, 복잡도, 사용자 선택, 안테나 선택

Key word : MIMO, MU-Massive MIMO networks, Complexity, User selection, Antenna selection

접수일자 : 2014. 11. 11 심사완료일자 : 2014. 12. 07 게재확정일자 : 2014. 12. 22

* **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.2015.19.1.77>

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 대용량 멀티미디어 서비스의 급증으로 무선 데이터 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있으며 이러한 증가 추세는 앞으로 더욱 가속화될 것으로 예측되고 있으므로, 이동통신 네트워크 전송 용량을 획기적으로 개선시킬 필요가 있다[1]. 차세대 이동통신 네트워크의 전송 용량을 획기적으로 개선시키기 위하여 소형 셀 기반 이종 네트워크 기술, 주파수 대역폭의 확장, 그리고 다중 안테나 (Multiple Input Multiple Output: MIMO) 기술 등이 핵심 요소 기술로 고려되고 있다[2,3]. 특히, 무선랜과 Long-Term Evolution (LTE) 네트워크에서 그 기술적 효과가 이미 검증된 MIMO 기술에 대한 관심이 높으며, 나아가 기지국에 수백 또는 수천 개의 거대한 수 (Massive)의 안테나를 이용하여 단말과 데이터를 주고받을 수 있는 거대 MIMO 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [4,5]. 이런 Massive MIMO 네트워크에는 해결해야 할 두 가지 문제점이 있다. 첫째, 기지국과 달리 단말에는 크기와 비용 문제로 인해 많은 수의 안테나를 탑재할 수 없으므로 네트워크의 성능이 단말의 안테나 수에 의해서 제한된다. 따라서, 다중 사용자 다중 안테나 (Multiple User MIMO: MU-MIMO) 기술을 활용하여 네트워크 용량을 개선할 필요가 있으며, 이를 위해서 효율적인 다중 사용자 스케줄링 알고리즘의 개발이 필요하다[6,7]. 두 번째, 안테나의 수와 동일한 신호 처리부 (Baseband와 Radio Frequency(RF) 처리부)가 기지국에 필요하므로 안테나의 수가 증가할수록 기지국의 하드웨어 복잡도와 비용이 기하급수적으로 증가한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 안테나의 수 보다 적은 신호 처리부를 기지국에 구현하고 신호 처리부의 개수만큼의 안테나를 적응적으로 선택하여 활용하는 안테나 선택 기술을 활용할 필요가 있다[8,9]. 그러므로, 다중 사용자 거대 다중 네트워크에서는 송신 안테나와 수신 사용자를 동시에 효과적으로 선택할 수 있는 알고리즘이 필요하다. Brute-Force 탐색 기반의 알고리즘은 최적의 성능에도 불구하고, $O\left(N C_{S_u} \sum_{i=1}^{\min(S_u, K)} K C_i\right)$ 의 높은 복잡도를 가진다. 여기서 N , S_u , K 는 송신 안테나의 수, 기지국에 탑재된 신호 처리부의 개수 (즉, 선택되는 안테나의 개수), 사용자의 수를 각각 나타내며 사용자들의 수신 안테나 개수는 1로

가정하였다. 특히, N 과 K 의 값이 증가할수록 복잡도는 기하급수적으로 증가한다.

본 논문에서, 최적 기법 대비 알고리즘의 복잡도를 획기적으로 감소시킬 수 있는 새로운 사용자 및 안테나 선택 기법을 제안한다. 제안된 방식은 최적 기법 대비 획기적으로 낮은 $O((N-S_u+1) \times \min(S_u, K))$ 의 계산 복잡도를 나타낸다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크를 위한 시스템 모델과 채널 모델에 대해서 설명한다. III장에서는 낮은 계산 복잡도를 가지면서 채널 상황에 따라서 사용자와 송신 안테나를 동시에 적응적으로 선택할 수 있는 기법을 제안한다. IV장에서는 제안 방식의 성능을 전송율과 계산 복잡도 측면에서 분석하고 Brute-Force 탐색 기반 최적 기법의 성능과 비교한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 및 채널 모델

본 논문에서는 N 개의 송신안테나를 가지는 기지국이 단일 안테나를 가지는 K 명의 사용자들에게 데이터를 동시에 전송할 수 있는 다중 사용자 다중 안테나 네트워크를 고려한다. 특히, $N \gg K$ 인 거대 다중 안테나 환경을 고려한다. 기지국은 비용과 복잡도의 제약으로 인하여 S_u ($S_u \leq N$) 개의 신호 처리부를 탑재하고 있기 때문에, N 개의 안테나 중에서 S_u 개의 안테나만을 선택하여서 데이터를 전송하여야 한다. 기지국은 채널 상황에 따라서 S_u ($1 \leq S_u \leq \min(S_u, K)$) 명의 사용자를 적응적으로 선택하여 동시에 데이터를 전송한다. 그림 1은 $N=5, S_u=3, K=4, S_u=2$ 인 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크를 예시적으로 나타낸다. 본 논문에서는 표기법의 단순화를 위해서, S_u 개 선택된 안테나를 1부터 S_u 까지 연속적으로 표기하고 S_u 명의 선택된 사용자를 1부터 S_u 까지 연속적으로 표기한다.

기지국이 i 번째 선택된 사용자에게 전송하는 신호를 나타내는 x_i 는 다음 조건을 만족한다.

$$\|x_i\|^2 = p_i, \quad \sum_{i=1}^{S_u} p_i = P \quad (1)$$

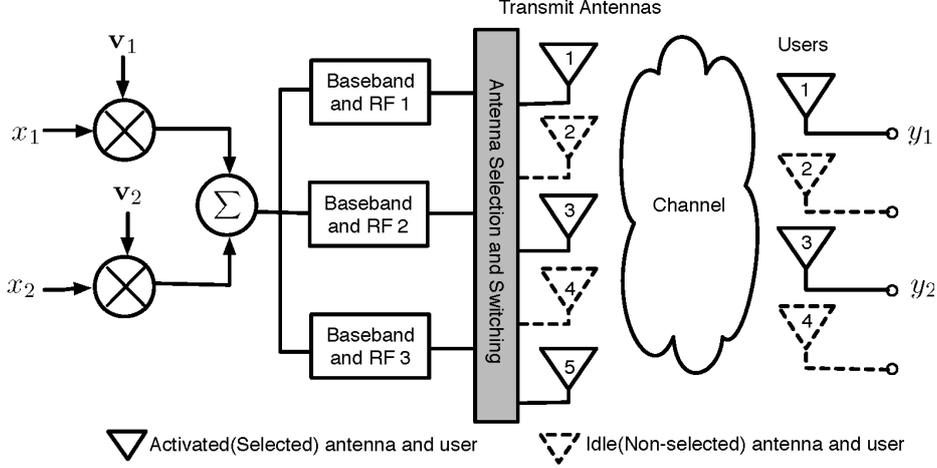


그림 1. 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크 ($N=5, S_a=3, K=4, S_u=2$)
 Fig. 1 Multi-User Massive MIMO Network ($N=5, S_a=3, K=4, S_u=2$)

여기서, p_i 와 P 는 i 번째 선택된 사용자에게 할당되는 전송 전력과 기지국의 전체 전송 전력을 각각 나타낸다. 그리고, i 번째 선택된 사용자에게 전송하는 신호 x_i 에 곱해지는 $S_a \times 1$ 크기의 빔포밍 벡터를 \mathbf{v}_i 로 나타내면 $\|\mathbf{v}_i\|^2 = 1 \quad \forall i$ 를 만족한다. i 번째 선택된 사용자가 수신하는 신호 y_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \mathbf{h}_i^u \sum_{k=1}^{S_a} \mathbf{v}_k x_k + n_i \quad (2)$$

$$= \mathbf{h}_i^u \mathbf{v}_i x_i + \mathbf{h}_i^u \sum_{k=1, k \neq i}^{S_a} \mathbf{v}_k x_k + n_i$$

여기서, \mathbf{h}_i^u 는 S_a 개의 선택된 송신 안테나와 i 번째 선택된 사용자 사이의 채널정보를 나타내는 $1 \times S_a$ 크기의 행 벡터이고 n_i 는 평균이 0이고 분산이 1인 부가 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)을 나타낸다. 모든 채널 정보는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 정규 분포를 따르고 independent and identically distributed (i.i.d.)이다. 그리고, quasi-static block fading을 가정한다.

식(2)에서 i 번째 선택된 사용자의 수신 Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)은 다음과 같이 계산되며

$$\text{SINR}_i = \frac{p_i \|\mathbf{h}_i^u \mathbf{v}_i\|^2}{1 + \sum_{k=1, k \neq i}^{S_u} p_k \|\mathbf{h}_i^u \mathbf{v}_k\|^2}, \quad (3)$$

그에 따른 전송률은 $\log_2(1 + \text{SINR}_i)$ 로 주어진다. 그리고, 선택된 모든 사용자들의 전송율의 합은 다음과 같이 계산된다.

$$C = \sum_{i=1}^{S_u} \log_2(1 + \text{SINR}_i) \quad (4)$$

III. 제안하는 사용자 및 송신 안테나 선택 기법

최적의 사용자와 송신 안테나 선택 기법은 식 (4)에 나타난 사용자 전송율 합을 최대로 하는 최적의 사용자 조합과 송신 안테나 조합을 찾아야하므로, 그 복잡도가 $O\left({}_N C_{S_a} \sum_{i=1}^{\min(S_a, K)} {}_K C_i\right)$ 로 주어진다. N 과 K 가 증가할수록 복잡도가 기하급수적으로 증가하므로 실제 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크에 적용하기는 불가능하다.

표 1. 제한한 사용자 및 송신 안테나 선택 알고리즘
Table. 1 Proposed user and transmit antenna selection algorithm

1) Initially, sort $\| \mathbf{h}_j^a \|^2$ in descending order so that

$$\| \mathbf{h}_1^a \|^2 \geq \| \mathbf{h}_2^a \|^2 \geq \dots \geq \| \mathbf{h}_N^a \|^2$$

2) for $w = 1 : (N - S_a + 1)$
 a) Sort $\| \mathbf{h}_{i,w}^u \|^2$ in descending order so that

$$\| \mathbf{h}_{1,w}^u \|^2 \geq \| \mathbf{h}_{2,w}^u \|^2 \geq \dots \geq \| \mathbf{h}_{K,w}^u \|^2$$

b) for $S_u = 1 : \min(S_a, K)$
 i) for $k = 1 : S_u$
 Find precoder vector \mathbf{v}_{i,w,S_u}
 Compute SINR $_{i,w,S_u}$ for i -th terminal
 ii) Compute sum-rate of S_u terminals from
 $\hat{1}$ to \hat{S}_u

$$C_{w,S_u} = \sum_{i=1}^{\hat{S}_u} \log_2(1 + \text{SINR}_i)$$

3) Find $[w^*, S_u^*] = \arg \max_{w, S_u} (C_{w, S_u})$

따라서, 본 논문에서는 복잡도를 획기적으로 낮추는 새로운 사용자와 송신 안테나 선택 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 표 1에서 기술된 바와 같이 송신 안테나 선택과 사용자 선택 과정으로 구분된다. 먼저, $j(1 \leq j \leq N)$ 번째 안테나와 모든 K 명의 사용자간의 채널 정보를 $K \times 1$ 크기의 열 벡터를 \mathbf{h}_j^a 로 정의하고 모든 안테나를 $\| \mathbf{h}_j^a \|^2$ 의 크기에 따라서 내림차순으로 정렬한다. 새롭게 정렬된 안테나들의 인덱스를 $\hat{j}(1 \leq \hat{j} \leq \hat{N})$ 로 표시한다. 즉, 새롭게 정렬된 안테나들에 대해서 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$\| \mathbf{h}_1^a \|^2 \geq \| \mathbf{h}_2^a \|^2 \geq \dots \geq \| \mathbf{h}_N^a \|^2 \quad (5)$$

새롭게 정렬된 안테나들 중에서 연속적인 S_a 개의 안테나들의 집합을 하나의 윈도우로 정의한다. 첫 번째 윈도우에 포함되는 안테나는 $\{\hat{1}, \dots, \hat{S}_a\}$ 이고 마지막 윈도우에 포함되는 안테나는 $\{\widehat{N - S_a + 1}, \dots, \hat{N}\}$ 이며, 총 $(N - S_a + 1)$ 개의 윈도우가 존재한다.

안테나 $\{\widehat{w}, \dots, \widehat{w + S_a - 1}\}$ 로 구성된 임의의 w 번째 윈도우가 주어질 때, i 번째 사용자가 그 윈도우에 포함된 모든 안테나들로 수신하는 채널 정보를 $1 \times S_a$ 크기의 행 벡터 $\mathbf{h}_{i,w}^u$ 로 정의하고, K 명의 사용자를 윈도우에 포함된 안테나들로부터 수신하는 채널 이득의 합에 따라서 내림 차순으로 정렬한다. 앞서 안테나 정렬에서와 유사하게 새롭게 정렬된 사용자들의 인덱스를 $\hat{i}(1 \leq \hat{i} \leq \hat{K})$ 로 표현하면, 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$\| \mathbf{h}_{1,w}^u \|^2 \geq \| \mathbf{h}_{2,w}^u \|^2 \geq \dots \geq \| \mathbf{h}_{K,w}^u \|^2 \quad (6)$$

$S_u(1 \leq S_u \leq \min(S_a, K))$ 명의 사용자를 $\{\hat{1}, \hat{2}, \dots, \hat{S}_u\}$ 로 선택하고 안테나 윈도우 w 에 대응되는 빔포밍 벡터, \mathbf{v}_{i,w,S_u} 를 계산한 후 S_u 명의 SINR을 다음과 같이 계산한다.

$$\text{SINR}_{i,w,S_u} = \frac{p_i \| \mathbf{h}_{i,w}^u \mathbf{v}_{i,w,S_u} \|^2}{1 + \sum_{k=1, k \neq i}^{\hat{S}_u} p_k \| \mathbf{h}_{i,w}^u \mathbf{v}_{k,w,S_u} \|^2} \quad (7)$$

마지막으로 S_u 명의 전송율의 합을 구한 후, 사용자들의 전송률의 합이 최대가 되는 안테나 윈도우 w 와 사용자 조합을 결정함으로써 알고리즘이 종료된다.

제안 방식은 Brute-Force 탐색 기반의 최적 방식과 달리 $(N - S_a + 1)$ 개의 안테나 윈도우 각각에 대해서 $\min(S_a, K)$ 개의 사용자 그룹에 대해서만 탐색을 하기 때문에 그 복잡도가 $O((N - S_a + 1) \times \min(S_a, K))$ 로 최적 방식 대비 획기적으로 감소할 뿐만 아니라, N 과 K 에 대해서 선형적으로 증가한다.

IV. 성능 분석

본 장에서는 III장에서 제안된 송신 안테나와 사용자 선택 기법의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 평균 사용자 전송율의 합 관점에서 분석하고, Brute-Force 탐색 기반의 최적 방식의 성능과 비교한다. 성능 분석을 위하여 Block-Diagonalization 기반의 빔포밍 방식을 가정하고, 사용자들 간에 동일 전송 전력 할당 방식을 고

려한다[10].

그림 2는 K 에 따른 평균 사용자 전송률의 합을 나타낸다. $N=10$ 이고 $S_a=7$ 로 가정하였으며 SNR은 0, 10, 또는 20 dB로 설정하였다. 제안 방식은 최적 방식 대비 낮은 전송률을 나타내지만, 그 차이가 크지 않다. 구체적으로, SNR이 20dB인 경우, K 가 3, 6, 10일 때 제안 방식의 전송률은 최적 방식 대비 각각 2%, 6%, 11% 감소한다.

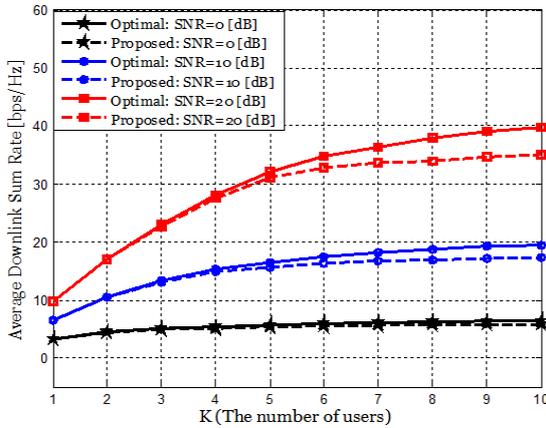


그림 2. 사용자 수 (K)에 따른 평균 사용자 전송률의 합 ($N=10, S_a=7$)

Fig. 2 Average sum rate vs. the number of users (K) ($N=10, S_a=7$)

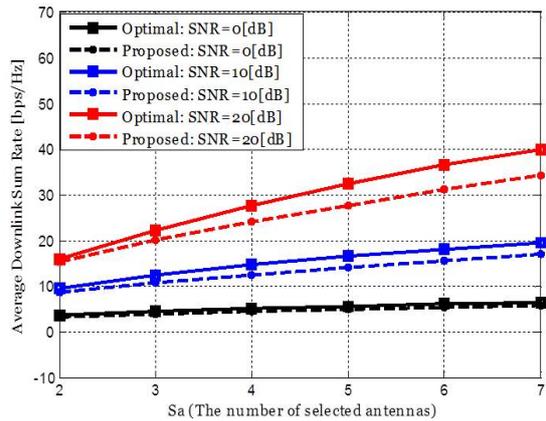


그림 3. 선택된 송신 안테나의 수 (S_a)에 따른 평균 사용자 전송률의 합 ($N=10, K=10$)

Fig. 3 Average sum rate vs. the number of selected antennas (S_a) ($N=10, K=10$)

그림 3은 $N=10$ 이고 $K=10$ 일 때 S_a 의 변화에 따른 평균 사용자 전송률의 합을 나타낸다. SNR이 20dB인 경우, S_a 가 2, 4, 7일 때 제안 방식의 전송률은 최적 방식 대비 각각 4%, 13%, 14% 감소하는 것을 알 수 있다.

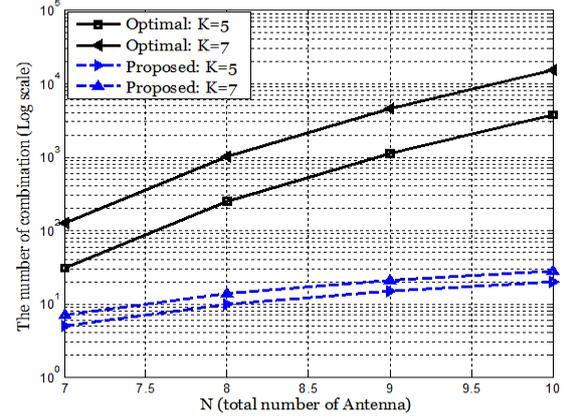


그림 4. 전체 사용자(N)에 따른 복잡도

Fig. 4 Complexity vs. the number of antennas (N)

그림 4는 제안 방식과 최적 방식의 계산 복잡도를 나타낸다.

최적 방식은 $O\left(N C_{S_a} \sum_{i=1}^{\min(S_a, K)} K C_i\right)$ 의 계산 복잡도를 가지는 반면, 제안 방식은 $O((N-S_a+1) \times \min(S_a, K))$ 의 계산 복잡도를 가지므로 알고리즘의 복잡도가 획기적으로 개선됨을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기지국에 탑재된 많은 송신 안테나를 이용하여 복수의 사용자들에게 동시에 데이터를 전송하는 MU-Massive MIMO 네트워크를 연구하였다.

특히, 기지국의 하드웨어 복잡도와 알고리즘의 계산 복잡도를 낮추기 위하여 채널 상황에 따라 송신 안테나와 데이터를 전송할 사용자의 조합을 적응적으로 선택하는 방식을 제안하였다. 제안 방식은 Brute-Force 탐색 기반의 최적 방식 대비 일부 성능 저하가 나타나지만 그 차이가 크지 않는 반면, 알고리즘의 복잡도를 획기적으로 낮출 수 있다. 일례로, $N=10, K=10, S_a=7$,

SNR = 10 dB 일 때 제안 방식은 최적 방식 대비 약 11%의 전송율 감소가 발생하지만, 계산 복잡도는 최적 방식의 5×10^{-4} 에 불과하다.

REFERENCES

- [1] Cisco White Paper, *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013-2018*, Feb. 2014.
- [2] Small Cell Forum, <http://smallcellforum.org>
- [3] 3GPP TS 36.300 v11.5.0 E-UTRA and E-UTRAN Overall description; Stage 2 (Release 11)
- [4] Yeon-geun Lim, Chan-Byoung Chae, "Understanding of Massive MIMO Technology", The Institute of Electronics and Information Engineers, Electronic Engineering Bulletin, Vol. 39, No. 11, pp. 63~70, Nov. 2012.
- [5] Erik G. Larsson, Ove Edfors, Fredrik Tufvesson, Thomas L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.
- [6] Kyeongjun Ko, Kyungchul Kim, and Jungwoo Lee, "BER based Multiuser MIMO User Selection with Block Diagonalization," *IEEE VTC 2010-Spring*, May. 2010.
- [7] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser mimo systems," ArXiv:1112.3810, cs.IT, May 2012.
- [8] Inaki Berenguer, Xiaodong Wang, Vikam Krishnamurthy, "Adaptive MIMO Antenna Selection," *IEEE Conference Record Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 2004, Vol. 1, pp. 21-26*, Nov. 2003.
- [9] Andreas F. Molisch, Moe Z. Win, "MIMO Systems with Antenna Selection - an overview," *IEEE RAWCON '03, pp.167-170*, Aug. 2003.
- [10] S. Shim, J. S. Kwak, R. W. Heath, and J. G. Andrews, "Block diagonalization for multi-user MIMO with other-cell interference", *IEEE Trans. Wireless Comm., vol. 7, no. 7, pp. 2671-2681*, July 2008.



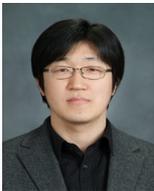
반태원(Tae-Won Ban)

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, 차세대 이동통신 시스템



정무웅 (Moo-woong Jeong)

2014년 2월 경상대학교 정보통신공학과 학사
 2014년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 석·박사 통합과정
 ※관심분야 : 이동통신, MIMO, D2D



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 : 차세대이동통신 시스템, 신호처리, 협력 및 중계통신, Cognitive Radios, Compressed Sensing