

## Multi-User Massive MIMO 네트워크에서 에너지 효율적인 전송 안테나 선택 기법

정무웅 · 반태원\*

### Energy Efficient Transmit Antenna Selection Scheme in Multi-User Massive MIMO Networks

Moo-Woong Jeong · Tae-Won Ban\*

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

#### 요 약

최근 들어서, Multi-User Massive MIMO 네트워크에서 하드웨어와 알고리즘 측면에서 복잡도를 낮추면서 높은 전송률을 얻을 수 있는 다양한 전송 안테나 선택 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 차세대 이동통신 네트워크에서 에너지 소모량을 줄이기 위한 다양한 기술들에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그래서, 본 논문에서는 Multi-User Massive MIMO 네트워크에서 낮은 계산 복잡도를 달성하면서 에너지 효율성을 높일 수 있는 전송 안테나 선택 기법을 연구하였다. 먼저, Brute-Force 탐색 기반의 최적 방식을 소개하고 최적 방식 대비 계산 복잡도를 획기적으로 줄일 수 있는 새로운 안테나 선택 기법을 제안하였다. 안테나 수가 증가할수록 최적 방식의 복잡도는 지수적으로 증가하는 반면 제안 방식은 선형적으로 증가한다. 그럼에도 불구하고, 제안 방식과 모든 경우를 고려하는 최적 방식의 에너지 효율 성능 차이는 크지 않다.

#### ABSTRACT

Recently, there have been many researches which can achieve high data rate in multi-user massive MIMO networks while reducing the complexity in terms of both hardware and algorithm. In addition, many researches have been conducted to reduce the energy consumption in next generation mobile communication networks. In this paper, we thus investigated new transmit antenna selection scheme to achieve low computational complexity and enhance energy efficiency in multi-user massive MIMO networks. First, we introduced the optimal scheme based on Brute-Force searching to maximize the energy efficiency and then proposed new antenna selection scheme to dramatically reduce the computational complexity compared to the optimal scheme. As the number of transmit antennas increases, the complexity of the optimal scheme exponentially increases while the complexity of the proposed scheme linearly increases. Nevertheless, the energy efficiency performance gap between proposed and optimal schemes is not huge.

**키워드** : MIMO, 다중 사용자 거대 다중 안테나 네트워크, 안테나 선택, 에너지 효율

**Key word** : MIMO, Multi-User Massive MIMO Networks, Energy Efficiency, Antenna Selection

Received 30 March 2016, Revised 04 April 2016, Accepted 18 April 2016

\* Corresponding Author Tae-Won Ban(E-mail:twvan35@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9177)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.7.1249>

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 들어서 폭발적으로 증가하고 있는 무선 데이터 트래픽을 효과적으로 수용하기 위해서 차세대 이동통신 네트워크의 전송 용량을 획기적으로 개선시킬 필요가 있으며[1], 후보 기술 중에 하나로 기지국에 거대한 수의 안테나를 탑재하여 여러 사용자와 동시에 데이터를 주고받을 수 있는 Multi-User Massive MIMO(다중 사용자 거대 다중 안테나) 기술을 고려하고 있다[2, 3]. 그러나, 기지국에서 거대한 안테나 개수와 동일한 신호 처리부(Baseband와 Radio Frequency)가 필요하므로 하드웨어 복잡도가 급격히 증가할 뿐만 아니라, 다중 안테나를 위한 빔 형성(Beam Forming) 알고리즘의 복잡도가 증가한다. 따라서, 기지국에 안테나 수 보다 적은 신호 처리부를 설치하고 설치된 신호 처리부만큼의 안테나만을 선택하는 안테나 선택 기술을 활용하여 복잡도를 낮출 필요가 있다[4-10].

다른 한편으로, 증가하는 무선 데이터 트래픽을 수용하기 위하여 많은 기지국들이 조밀하게 설치되면서 무선 네트워크의 에너지 소비량 또한 급격히 증가하였다. 2010년에 전 세계 무선 모바일 네트워크의 에너지 소비량이 약 120 TWh로 13억 달러에 이르는 것으로 조사되었다[11]. 향후, 차세대 네트워크에서 거대한 수의 안테나가 탑재될 경우 에너지 소비량은 기하급수적으로 증가할 것으로 예상된다[12, 13]. 따라서, 차세대 이동통신 네트워크에서는 데이터 전송용량뿐만 아니라, 에너지 소비량 또한 중요한 성능 지표중의 하나임에 틀림없다. 그럼에도 불구하고, 기존의 안테나 선택 기술에 관한 많은 연구들은 데이터 전송 속도의 개선에만 초점을 맞추었다. 본 논문에서는 Multi-User Massive MIMO 네트워크에서 전송 속도 뿐만 아니라 낮은 계산 복잡도로 에너지 효율성을 극대화할 수 있는 안테나 선택 기법에 대하여 연구를 진행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 Multi-User Massive MIMO 네트워크의 시스템 모델과 채널 모델에 대해서 설명한다. III장에서는 낮은 계산 복잡도로 높은 에너지 효율을 달성하는 전송 안테나 선택 기법을 제안한다. IV장에서는 제안된 안테나 선택 기법의 성능을 데이터 전송률과 에너지 효율성 측면에서 Monte-Carlo 기반 시뮬레이션을 통해서 분석한다. 마지막으로, V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 및 채널 모델

그림 1은 본 논문에서 다루고 있는 Multi-User Massive MIMO 네트워크의 하향 링크를 나타낸다. 기지국은  $N$ 개의 송신 안테나를 이용하여  $K$ 명의 사용자에게 동시에 데이터를 전송할 수 있다. 반면에, 기지국은  $S(K \leq S \leq N)$ 개의 신호 처리부만을 가지고 있으므로,  $N$ 개의 송신 안테나 중에서  $S$ 개만을 선택하여 데이터를 전송할 수 있다. 특히, 본 논문에서는  $N \gg K$ 인 거대 다중 안테나 환경을 주로 고려하며, 사용자들은 모두 단일 수신 안테나를 탑재하고 있는 것으로 가정한다. 기지국이  $i$ 번째 사용자에게 전송하는 신호  $x_i$ 는 다음 조건을 만족한다.

$$\|x_i\|^2 = p_i, \quad \sum_{i=1}^K p_i = p_t \times S = P_A \quad (1)$$

여기서  $p_i$ ,  $p_t$ , 그리고  $P_A$ 는 각각  $i$ 번째 사용자에게 할당되는 전송 전력, 기지국에서 데이터 전송을 위해서 선택된  $S$ 개의 안테나 각각에 할당되는 전력, 그리고 기지국의 전체 전송 전력을 나타낸다. 그리고  $i$ 번째 사용자가 수신하는 신호  $y_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} y_i &= \mathbf{h}_i^r \sum_{k=1}^K \mathbf{v}_k x_k + n_i \\ &= \mathbf{h}_i^r \mathbf{v}_i x_i + \mathbf{h}_i^r \sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{v}_k x_k + n_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{v}_i$ 는 기지국에서  $i$ 번째 사용자에게 전송하는 신호  $x_i$ 에 곱해지는  $S \times 1$  크기의 빔포밍 벡터를 나타내며,  $\|\mathbf{v}_i\|^2 = 1 \quad \forall i$ 를 만족한다. 그리고  $\mathbf{h}_i^r$ 는  $S$ 개의 선택된 전송 안테나들과  $i$ 번째 사용자 사이의 채널 계수(coefficient)를 나타내는  $1 \times S$  크기의 행 벡터이고,  $n_i$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 부가 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)를 나타낸다. 모든 채널 정보는 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 인 복소 정규 분포를 따르면서 independent and identically distributed(i.i.d)인 것으로 가정한다. 그리고 quasi-static block fading을 고려한다. 즉, 채널 정보들은 데이터를 전송하는 프레임 구간 내에서는 일정한 값을 가지

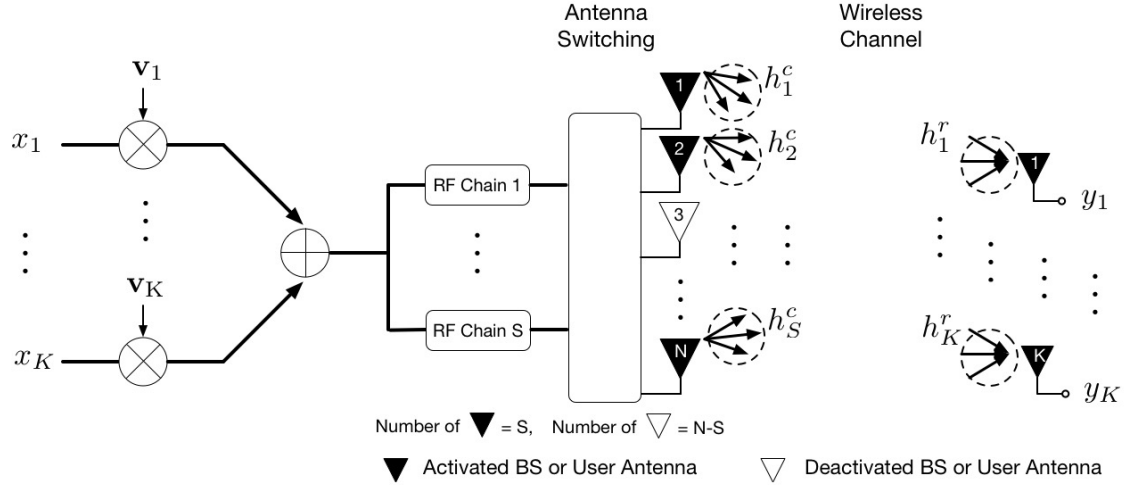


Fig. 1 Multi-user massive MIMO network

면서 매 프레임마다 독립적으로 변한다.

$i$  번째 사용자의 수신 신호 대 간섭 잡음비(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio: SINR),  $\mu_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{p_i \|\mathbf{h}_i^r \mathbf{v}_i\|^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^K p_k \|\mathbf{h}_i^r \mathbf{v}_k\|^2 + N_0} \\ &= \frac{\gamma_i \|\mathbf{h}_i^r \mathbf{v}_i\|^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \gamma_k \|\mathbf{h}_i^r \mathbf{v}_k\|^2 + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\gamma_i = p_i/N_0$ 는 송신 전력대비 잡음비 (Signal to Noise Ratio: SNR)을 나타내며, 본 논문에는 수학적 간편성을 위하여 모든 사용자들의 SNR이  $\gamma$ 로 동일한 것으로 가정한다.

그에 따른 전송률의 합,  $C$ 는  $\sum_{i=1}^K \log_2(1 + \mu_i)$ 로 주어진다. 마지막으로, 기지국 송신단의 전력 증폭기의 효율을  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )로 가정할 때, 각 안테나당 에너지 효율 지수를 다음과 같이 정의한다.

$$E = \frac{C}{P_A \times S \times (1 + \alpha)} \text{ [bps/Hz/Watt/Ant]} \quad (4)$$

### III. 에너지 효율성을 고려한 송신 안테나 선택 기법

에너지 효율성을 최대화하기 위해서는 식 (4)에 정의된 에너지 효율 지수를 최대로 하는 최적의 송신 안테나  $S$ 개를 찾아야하므로, 그 복잡도가  $\mathcal{O}(N C_S)$ 로 주어진다.  $N$ 이 증가할수록 복잡도가 기하급수적으로 증가하므로 실제 Multi-User Massive MIMO 네트워크에 적용하기는 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 최적 방식과 유사한 에너지 효율성을 가지면서 계산 복잡도를  $\mathcal{O}(N-S+1)$ 로 획기적으로 줄일 수 있는 새로운 송신 안테나 선택 기법을 제안한다. 제안 알고리즘에서는,  $j$  ( $1 \leq j \leq N$ ) 번째 안테나와 전체 사용자  $K$ 명 사이의 채널 정보를  $K \times 1$  크기의 열 벡터  $\mathbf{h}_j^c$ 로 정의한 다음에, 모든 안테나를  $\|\mathbf{h}_j^c\|^2$ 의 크기에 따라서 내림차순으로 정렬한다. 그리고 새롭게 정렬된 안테나들의 인덱스를  $\hat{j}$  ( $1 \leq \hat{j} \leq \hat{N}$ )로 나타낸다. 즉, 새롭게 정렬된 안테나들에 대해서 다음과 같은 수식이 성립한다.

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

새롭게 정렬된 안테나들 중에서 연속적인  $S$ 개의 안테나 집합을 하나의 윈도우라고 정의한다.

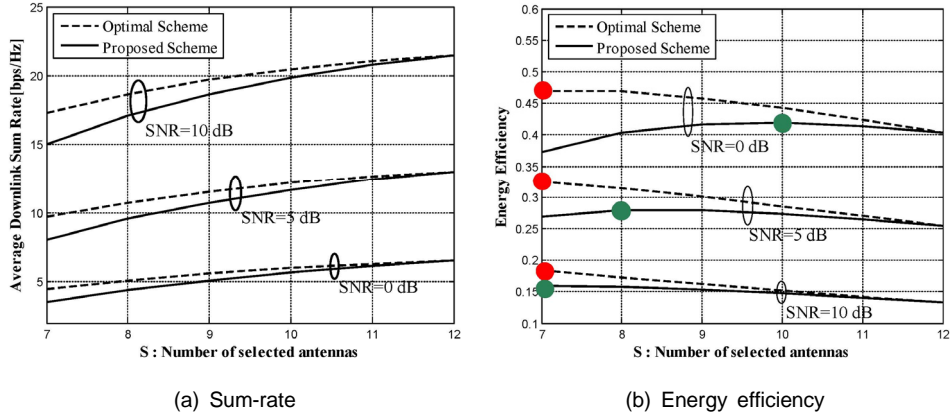


Fig. 2 Average sum rate and energy efficiency vs. the number of selected antennas( $S$ ) ( $N=12$ ,  $K=6$ )

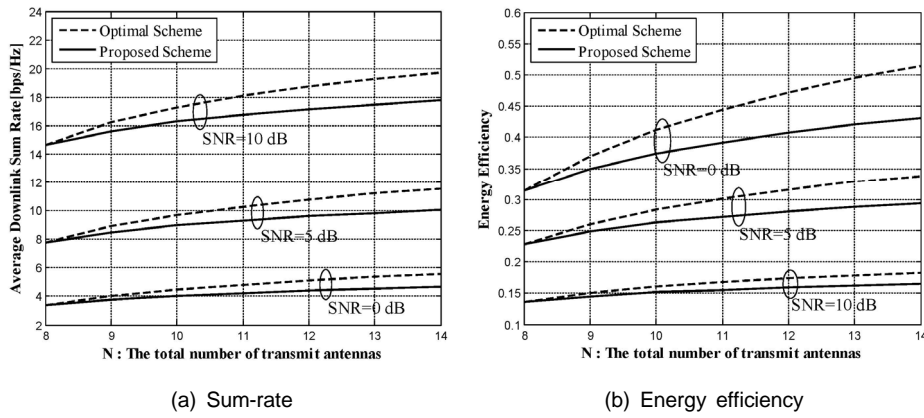


Fig. 3 Average sum rate and energy efficiency vs. the total number of transmit antennas( $N$ ) ( $K=6$ ,  $S=8$ )

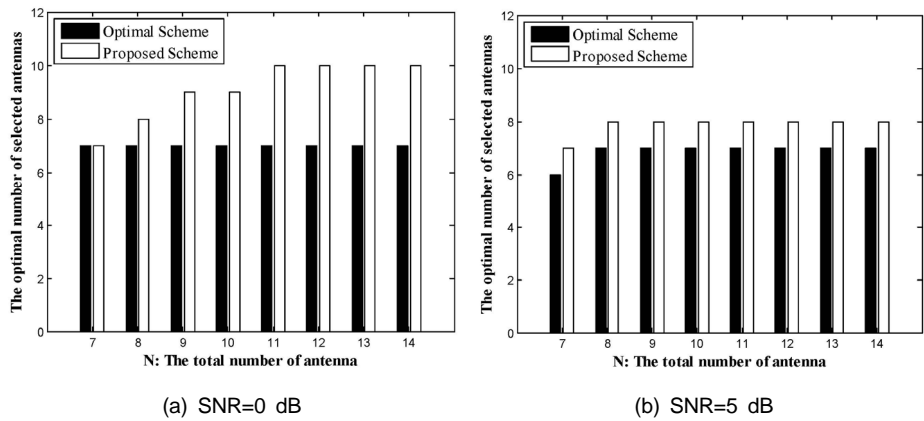


Fig. 4 The optimal number of selected antennas vs. the total number of transmit antennas( $N$ ) ( $K=6$ )

즉, 첫 번째 윈도우에 포함되는 안테나는  $\{\hat{1}, \dots, \hat{S}\}$  이고 마지막 윈도우에 포함되는 안테나는  $\{\widehat{N-S+1}, \dots, \widehat{N}\}$  이므로, 총  $(N-S+1)$  개의 윈도우를 정의할 수 있다. 마지막으로,  $(N-S+1)$  개의 윈도우 중에서 가장 높은 에너지 효율성을 가지는 윈도우를 선택함으로써 알고리즘이 종료된다. 따라서,  $N C_S$  번의 반복 계산을 필요로 하는 최적 방식과 달리 제안 방식은  $(N-S+1)$  번의 반복 계산을 통해서 전송 안테나 조합을 선택할 수 있다.

#### IV. 성능 분석

성능 분석을 위하여 Block-Diagonalization 기반의 빔포밍 방식을 가정하며 사용자들 간에 동일 전송 전력 할당 방식을 고려한다[14]. 그리고 모든 시뮬레이션에서 채널 정보는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 표준정규분포로 주어졌고, 기지국의 전력 증폭기의 효율을 35%로 적용하였다.

그림 2는  $K=6$  이고  $N=12$  일 때,  $S$  에 따른 전송률의 합과 에너지 효율을 나타낸다. 그림 2-(a)에서는  $S$  가 증가할수록 전송률의 합 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 그림 2-(b)에서는 에너지 효율 측면을 극대화하려면 적절한  $S$  를 선택할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 그림 2-(b) 내의 빨간색과 초록색 동그라미는 각각 최적 방식과 제안 방식의 최대 성능 지점이다. 표 1에 전송률을 최대로 하는 전송 안테나 개수가 SNR에 따라서 정리되어 있다. 예를 들어 SNR이 0, 5, 10 dB 일 때, 최적 방식은 안테나를 7개를, 제안된 송신 안테나 선택 방식은 각각 10, 8, 7개를 선택하는 것이 가장 높은 에너지 효율을 보인다.

그림 3은  $K=6$  이고  $S=8$  일 때,  $N$  에 따른 전송률의 합과 에너지 효율을 나타낸다. 전송률의 합과 에너지 효율 모두  $N$  이 증가함에 따라서 성능이 증가한다. 게다가 전송률의 합 측면에서는 SNR이 감소할수록 제안된 방식과 최적 방식의 성능 차이가 감소하는 반면에, 에너지 효율 측면에서는 SNR이 증가할수록 제안된 방식과 최적 방식의 성능 차이가 감소한다. 예를 들어  $N=10$  인 경우에, 최적 방식 대비 제안 방식의 성능 감소율은, SNR이 0, 5, 10 dB 일 때, 각각 약 9%, 7%, 5% 이다. 이처럼 낮은 복잡도를 가짐에도 불구하고 최적

방식의 성능과 차이가 크지 않다.

마지막으로 그림 4는  $K=6$  일 때,  $N$  에 따라서 에너지 효율성을 최대화할 수 있는 최적의 전송 안테나 개수를 나타낸다. 전체 안테나 수가 증가할수록 최적의 선택 안테나 개수도 증가하는 것을 알 수 있다.

#### V. 결론

본 논문에서는 Multi-User Massive MIMO 네트워크에서 매우 낮은 계산 복잡도로 높은 에너지 효율성을 달성 할 수 있는 전송 안테나 선택 기법을 연구하였다. 먼저, Brute-Force 기반의 최적 안테나 선택 기법을 소개하고, 최적 방식 대비 낮은 복잡도를 가지는 새로운 전송 안테나 선택 기법을 제안하였다. 두 방식의 성능을 에너지 효율성뿐만 아니라 전송률의 합 측면에서도 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해서 분석하였다. 성능 분석 결과에 따르면 제안된 송신 안테나 선택 기법은 최적 방식 대비 계산 복잡도를  $O(N C_S)$  에서  $O(N-S+1)$  로 획기적으로 낮출 수 있는 반면 네트워크의 전체 전송률의 합과 에너지 효율성 측면에서 손실이 크지 않은 것으로 나타났다.

Table. 1 Optimal number of selected transmit antenna

| SNR[dB] \ Scheme | Optimal | Proposed |
|------------------|---------|----------|
| 0                | 7       | 10       |
| 5                | 7       | 8        |
| 10               | 7       | 7        |

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. B0101-15-1272, Development of Device Collaborative Giga-Level Smart Cloudlet Technology)

REFERENCES

[ 1 ] Cisco White Paper, Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020, Feb. 2016.

[ 2 ] Y. G. Lim, C. B. 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.

[ 3 ] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.

[ 4 ] I. Berenguer, X. Wang, and V. Krishnamurthy, "Adaptive MIMO Antenna Selection," in *Proceeding of IEEE Conference Record Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 21-26, Nov. 2003.

[ 5 ] A. F. Molisch and M. Z. Win, "MIMO Systems with Antenna Selection - an overview," in *Proceeding of IEEE RAWCON*, pp.167-170, Aug. 2003.

[ 6 ] R. Chen, J. G. Andrews and R. W. Heath, "Efficient transmit antenna selection for multi-user MIMO systems with block diagonalization," in *Proceeding of IEEE GLOBECOM*, pp.3499-3503, Dec. 2007.

[ 7 ] T. Cheng and C. Yuan, "Low complexity general antenna selection algorithm for MU-MIMO-BC systems," in *Proceeding of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp.1-5, Sep. 2009.

[ 8 ] S. Sanayei and A. Nosratinia, "Antenna selection in MIMO systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 10, pp.68-73, Oct. 2004.

[ 9 ] P. H. Lin and S. H. Tsai, "Performance analysis and algorithm designs for transmit antenna selection in linearly precoded multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Veh. Techn.*, vol. 61, no. 4, pp. 1698-1708, May 2012.

[10] T. W. Ban and B. C. Jung, "Sliding Window-ased Transmit Antenna Selection for Large-Scale MU-MIMO Networks," *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol. E97-A, no. 7, pp. 1640-1641, Jul. 2014.

[11] "Mobile's Green Manifesto 2012," GSM Association, www.gsma.com/mee.

[12] Z. Zhou, S. Zhou, J. Gong, and Z. Niu, "Energy-Efficient Antenna Selection and Power Allocation for Large-Scale Multiple Antenna Systems with Hybrid Energy Supply," in *Proceeding of IEEE GLOBECOM 2014*, Dec. 2014.

[13] C. Jiang and L. J. Cimini, "Antenna Selection for Energy-Efficient MIMO Transmission," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 1, no. 6, pp. 577-580, Dec. 2012.

[14] 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