

논문 2015-52-3-3

# Massive MIMO WPCN에서 에너지 효율 향상을 위한 안테나 수 최적화 기법

## ( Optimization of the Number of Antennas for Energy Efficiency in Massive MIMO WPCN )

한 용 규\*, 심 동 규\*, 이 충 용\*\*

( Yonggue Han, Dongkyu Sim, and Chungyong Lee<sup>Ⓢ</sup> )

### 요 약

본 논문에서는 massive multiple-input multiple-output (MIMO) 기반의 wireless powered communication network (WPCN)에서 에너지 효율을 향상시키기 위한 기지국 안테나 수 최적화 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 massive MIMO 시스템의 채널 hardening 특성을 이용하여 채널 이득을 안테나 수에 대한 식으로 근사한다. 그리고 근사화 된 최적화 문제에 편미분을 적용한 후 Lambert-W 함수를 이용하여 최적해를 closed form으로 찾는다. 모의실험을 통해 제안하는 기법의 근사 과정과 최적화 문제를 해결하는 방법이 적절함을 보이고, closed form 해가 exhaustive search 방법으로 찾은 해와 오차가 크지 않음을 확인한다.

### Abstract

We introduce an optimization of the number of base station antennas in massive multiple-input multiple-output (MIMO) wireless powered communication network (WPCN). We use channel hardening property of massive MIMO system to approximate channel gain in terms of the number of base station antennas. Then, we find an optimal solution by partial differential and obtain a closed form solution by using Lambert-W function. The simulation results show that the approximation and the method of solving the optimization problem are reasonable, and the optimal solution of proposed scheme is almost identical to the optimal number of base station antennas by the exhaustive search method.

**Keywords :** Massive MIMO, energy harvesting, WPCN, 에너지 효율, 안테나 수 최적화

## I. 서 론

한 설문조사에 따르면, 약 80%의 스마트폰 사용자들

은 배터리 수명을 증가시키기 위한 어플리케이션 또는 설정을 사용한다고 한다<sup>[1]</sup>. 이러한 스마트폰 사용자들의 배터리 수명에 대한 요구를 충족시키기 위해 기존의 전송률 향상을 위한 기술뿐만 아니라 에너지 효율적인 통신 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 이와 더불어 radio frequency (RF) 신호로 에너지를 전송하는 무선 에너지 전송(wireless energy transfer; WET) 기술 또한 최근 활발히 연구되고 있다<sup>[2]</sup>. 종래에는 거리에 따라 전자기파의 세기가 급격히 감쇄되는 경로 손실(path loss) 현상에 의해 짧은 거리의 무선 에너지 전송만 가능하였으나, 현재는 다중 안테나를 이용한 에너지 빔형

\* 학생회원, \*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과  
(Department of Electrical and Electronic  
Engineering, Yonsei University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: cylee@yonsei.ac.kr)

※ “이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (N0. 2013R1A1A2012846)”

Received ; November 24, 2014 Revised ; February 24, 2015

Accepted ; February 26, 2015

성(beamforming) 기술로 그 거리를 확장하고 있다. 특히 차세대 무선 통신의 요소기술로 많은 주목을 받고 있는 massive multiple-input multiple-output (MIMO) 기술을 적용하는 경우, 기지국에서 매우 많은 수의 안테나를 사용함으로써 얻는 안테나 배열 이득에 의해 경로 손실 현상을 극복하고 중, 장거리의 무선 에너지 전송을 수행할 수 있다<sup>[3]</sup>.

최근 무선 에너지 전송 기술을 이용한 무선 통신 시스템 중 하나인 wireless powered communication network (WPCN)를 기반으로 한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[4~5]</sup>. WPCN은 하이브리드 기지국(hybrid base station; H-BS)이 하이브리드 단말(hybrid user equipment; H-UE)에게 에너지를 무선으로 전송하고, 하이브리드 단말은 하이브리드 기지국이 전송한 에너지를 수확하여 데이터 전송(wireless information transmission; WIT)에 사용하는 시스템이다. 여기서 하이브리드 기지국은 에너지 전송 및 데이터 수신, 하이브리드 단말은 에너지 수신 및 데이터 송신을 모두 수행할 수 있는 기지국과 단말을 의미한다.

WPCN을 도입한 초기 연구 결과 중 하나인 [4]는 다중 사용자 WPCN에서 전송률 합을 최대화 하는 최적의 전송 시간 배분에 대해 연구하였다. 이 때 [4]에서는 전송률 합에 초점을 두었기 때문에 송신 파워 및 에너지 효율은 고려되지 않았다. 참고문헌 [5]는 기지국이 massive MIMO 기술을 사용하는 WPCN에서 에너지 효율 향상을 위해 ‘하이브리드 기지국의 송신 파워’와 ‘에너지 전송 시간 대 데이터 전송 시간 비’를 최적화하였다. 하지만 최근 에너지 효율 관련 연구들과 달리 RF chain에서 소모되는 에너지를 고려하지 않았다<sup>[6]</sup>. RF chain에서 소모되는 에너지는 하이브리드 기지국 안테나 수에 비례하여 증가하므로, 에너지 효율 향상을 위해서는 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수를 찾을 필요가 있다<sup>[7]</sup>.

따라서 본 논문에서는 RF chain에서 소모되는 파워를 고려한 현실적인 에너지 소비 모델을 바탕으로, WPCN에서 에너지 효율의 향상을 위한 하이브리드 기지국 안테나 수 최적화 기법을 제안한다. 그리고 massive MIMO 시스템의 특징을 이용하여 최적화 문제를 근사하여 풀고, 에너지 효율을 최대화하는 최적의 기지국 안테나 수를 구한다. 마지막으로 모의실험 결과를 통해 제안하는 기법의 성능을 검증하고, 결론 및 추

후 연구 방향에 대하여 논의한다.

## II. 시스템 모델과 에너지 효율

### 1. 시스템 모델

그림 1과 같이  $N_t$ 개의 안테나를 가지는 massive MIMO 하이브리드 기지국과 하나의 안테나를 가지는 하이브리드 단말로 구성된 massive MIMO 단일 사용자(single user; SU) WPCN 시스템을 고려한다. 하향링크 무선 에너지 전송과 상향링크 무선 데이터 전송은 총  $T$  시간의 동작 주기 동안 시분할 방식(time division duplex; TDD)로 동작하며 채널 reciprocity가 성립한다고 가정한다. 하이브리드 기지국은  $\tau$  시간 동안 하이브리드 단말에게 에너지를 전송하고, 하이브리드 단말은 에너지를 수확한다. 그리고 하이브리드 단말은 수확한 에너지를 모두 사용하여 남은  $T - \tau$  시간 동안 하이브리드 기지국으로 데이터를 전송한다. 하이브리드 기지국과 하이브리드 단말 사이의 하향링크 채널  $\sqrt{\alpha_{DL}} \mathbf{h}$ 는  $1 \times N_t$  크기의 벡터로 표현되고, 상향링크 채널은 채널 reciprocity에 의해  $N_t \times 1$  크기의 벡터  $\sqrt{\alpha_{UL}} \mathbf{h}^H$ 로 표현된다. 이때,  $\sqrt{\alpha_{DL}}$ ,  $\sqrt{\alpha_{UL}}$ 은 각각 하향링크 채널과 상향링크 채널의 경로 손실을 의미하며,  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{h}^H$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 independent and identically distributed (i.i.d.) 복소 가우시안 분포를 따르는 원소들로 구성된 고속 페이딩 벡터를 의미한다. 또한 하이브리드 기지국은 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정한다.

하이브리드 기지국은 에너지 전송률을 최대화하기

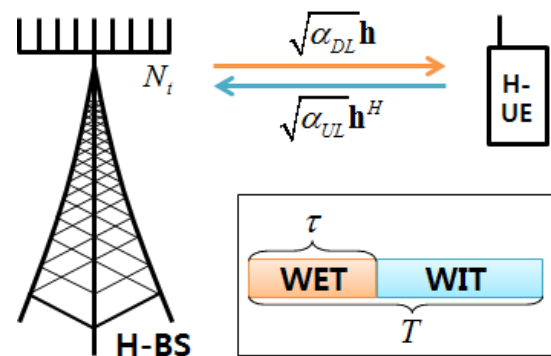


그림 1. Massive MIMO 단일 사용자 WPCN 시스템  
Fig. 1. Massive MIMO SU-WPCN system.

위해 maximal ratio combining at the transmitter (MRT) 전처리 기법을 사용하고, 하이브리드 단말은 식 (1)과 같이  $\tau$  시간 동안 총  $Q_{harv}$ 의 에너지를 수확한다<sup>[4]</sup>.

$$Q_{harv} = \eta_{EC} \alpha_{DL} P_T \|\mathbf{h}\mathbf{f}\|^2 \tau = \eta_{EC} \alpha_{DL} P_T \|\mathbf{h}\|^2 \tau, \quad (1)$$

이때,  $\eta_{EC}$ 는 하이브리드 단말이 전송 받은 에너지를 저장할 때의 에너지 변환 효율,  $P_T$ 는 하이브리드 기지국의 송신 파워,  $\mathbf{f} = \mathbf{h}^H / \|\mathbf{h}\|$ 은 MRT 전처리 벡터이다.

하이브리드 단말은 수확한 에너지를 상향링크 데이터 전송 시간  $T - \tau$  동안 균등하게 나누어 사용한다. 따라서 하이브리드 단말이 상향링크 데이터 전송을 수행할 때 하이브리드 기지국의 수신 신호는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{Q_{harv}}{T - \tau}} \sqrt{\alpha_{UL}} \mathbf{h}^H \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

여기서  $s$ 는 크기가 1인 송신 신호이고,  $\mathbf{n}$ 은 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 인 원소들로 구성된  $N_t \times 1$  크기의 가우시안 백색 부가 잡음 벡터이다. 하이브리드 기지국은 식 (3)과 같이 single-input multiple-output (SIMO) 환경에서 전송률을 최대화하는 maximal ratio combining (MRC) 기법을 사용한다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{w}\mathbf{y} = \sqrt{\frac{Q_{harv}}{T - \tau}} \sqrt{\alpha_{UL}} \mathbf{h}\mathbf{h}^H \mathbf{s} + \mathbf{h}\mathbf{n}, \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{w} = \mathbf{h}$ 는 MRC 수신 필터를 의미한다.

식 (3)의 수신 신호 식으로부터 하이브리드 기지국의 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio; SNR)은 식 (4)와 같이 계산되므로,  $T - \tau$  시간 동안의 총 전송률  $R_{tot}$ 은 식 (5)와 같다.

$$SNR = \frac{Q_{harv} \alpha_{UL} \|\mathbf{h}\|^2}{(T - \tau) N_0} = \frac{\eta \alpha_{DL} \alpha_{UL} P_T \tau \|\mathbf{h}\|^4}{(T - \tau) N_0}, \quad (4)$$

$$R_{tot} = (T - \tau) W \log_2(1 + SNR), \quad (5)$$

이때  $W$ 는 스펙트럼 대역폭을 의미한다.

## 2. 에너지 효율

하이브리드 기지국에서  $T$  시간 동안 사용하는 총 에너지  $P_{tot}$ 은 식 (6)과 같이 모델링 할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$P_{tot} = (\eta_{PA} P_T + P_R N_t) \tau + P_C T, \quad (6)$$

여기서  $\eta_{PA}$ 는 파워 앰프의 비효율성,  $P_R$ 은 RF chain에서 소모되는 파워,  $P_C$ 는 기타 회로에서 소모되는 파워를 의미한다.

에너지 효율은  $T$  시간 동안의 총 전송률을  $T$  시간 동안 사용하는 총 에너지로 나누어 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$EE = \frac{R_{tot}}{P_{tot}}. \quad (7)$$

## III. 에너지 효율 향상을 위한 하이브리드 기지국 안테나 수 최적화 기법

하이브리드 기지국이 고정된 파워  $P_T$ 로 고정된 시간  $\tau$  동안 에너지를 전송한다고 할 때, 에너지 효율을 최대화하는 하이브리드 기지국 안테나 수를 찾는 최적화 문제는 식 (8)과 같이 설정할 수 있다.

$$N_t^* = \arg \max_{N_t} EE = \arg \max_{N_t} \frac{(T - \tau) W \log_2 \left( 1 + \frac{\eta \alpha_{DL} \alpha_{UL} P_T \tau \|\mathbf{h}\|^4}{(T - \tau) N_0} \right)}{(\eta_{PA} P_T + P_R N_t) \tau + P_C T}, \quad (8)$$

이때 채널  $\mathbf{h}$ 를 제외한 다른 모든 파라미터는 상수이지만,  $\mathbf{h}$ 는  $N_t$ 에 의존하는 랜덤 변수이므로 식 (8)의 최적화 문제를  $N_t$ 에 대해 직접적으로 풀기 어렵다. 따라서 massive MIMO 시스템의 채널 hardening 특성을 이용하여  $\|\mathbf{h}\|^2 \approx N_t$ 로 근사한다. 그러면, 식 (8)의 최적화 문제는 목적함수가  $N_t$ 에 대한 식으로 표현되는 식 (9)의 최적화 문제로 근사된다.

$$N_t^* \approx \arg \max_{N_t} \frac{(T - \tau) W \log_2 \left( 1 + \frac{\eta \alpha_{DL} \alpha_{UL} P_T \tau N_t^2}{(T - \tau) N_0} \right)}{(\eta_{PA} P_T + P_R N_t) \tau + P_C T}. \quad (9)$$

보조변수  $\zeta$ ,  $A$ ,  $B$ 를 사용하여 식 (9)를 간단히 표현하고, 하이브리드 기지국은 massive MIMO 기술을 사용하므로  $N_t \gg 1$ 을 가정하면 최적화 문제는 식 (10)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} N_t^* &\approx \operatorname{argmax}_{N_t} \frac{(T-\tau)W \log_2(1+\zeta^2 N_t^2)}{AN_t+B} \\ &\approx \operatorname{argmax}_{N_t} \frac{(T-\tau)W \log_2(\zeta^2 N_t^2)}{AN_t+B} \\ &= \operatorname{argmax}_{N_t} \frac{2(T-\tau)W \log_2(\zeta N_t)}{AN_t+B}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \zeta &= \sqrt{\frac{\eta \alpha_{DL} \alpha_{UL} P_T \tau}{(T-\tau)N_0}} \\ A &= P_R \tau \\ B &= \eta_{PA} P_T \tau + P_C T. \end{aligned}$$

총 에너지 소비량은  $N_t$ 에 대해 선형으로 증가하고, 총 전송률은  $N_t$ 에 대해 로그 스케일로 증가하므로 목적함수인 에너지 효율은  $N_t$ 에 대해 quasi-concave이다. 따라서 에너지 효율을 최대화 하는 최적의  $N_t^*$ 가 존재하고,  $N_t^*$ 는 식 (11)과 같이 편미분을 통하여 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial N_t} \left[ \frac{2(T-\tau)W \log_2(\zeta N_t)}{AN_t+B} \right] &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{\zeta(A N_t + B)}{(\ln 2) \zeta N_t} - A \log_2(\zeta N_t) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

보조변수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 를 이용하여  $\alpha \equiv \zeta N_t$ ,  $\beta \equiv \zeta B/A$ ,  $\gamma \equiv \ln(\alpha) - 1 = \ln(\alpha/e)$ 로 정의하면 식 (11)을 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\beta}{e} = e^{\ln(\alpha/e)} (\ln(\alpha) - 1) = \gamma e^\gamma. \quad (12)$$

$W(z)e^{W(z)} = z$ 로 표현되는 Lambert-W 함수를 이용하면 식 (12)로부터 식 (13)과 같은 closed form의 최적 안테나 수  $N_t^*$ 를 찾을 수 있다.

$$N_t^* = \frac{e^{W\left(\frac{\zeta B}{Ae}\right)+1}}{\zeta}. \quad (13)$$

#### IV. 모의실험 결과

제안하는 기법의 근사 과정 타당성과 closed form 해의 정확성을 보이기 위해 표 1과 같은 실험 환경에서 모의실험을 수행하였다.

그림 2는 하이브리드 기지국의 안테나 수에 따른 에너지 효율을 나타낸 그래프이다. 파란색 실선은 식 (8)의 목적 함수인 실제 에너지 효율을 의미하며, 빨간색 점선은 식 (10)의 목적 함수인 근사된 에너지 효율을 의미한다. 그리고 파란색 동그라미는 실제 에너지 효율로 부터 exhaustive search 방법으로 찾은 최적해이고,

표 1. 모의실험 환경

Table 1. Simulation environment.

Parameter	Value
Bandwidth ( $W$ )	10 [kHz]
Total duration ( $T$ )	5 [ms]
WET duration ( $\tau$ )	2.5 [ms]
Power amplifier inefficiency ( $\eta_{PA}$ )	1/0.12
Energy conversion efficiency ( $\eta$ )	0.8
Downlink path loss ( $\alpha_{DL}$ )	0.1
Uplink path loss ( $\alpha_{UL}$ )	0.1
Transmit power ( $P_T$ )	15 [W]
Noise variance ( $\sigma^2$ )	1 [W]
Circuit power ( $P_C$ )	45 [W]
RF chain power ( $P_R$ )	4.5 [W]

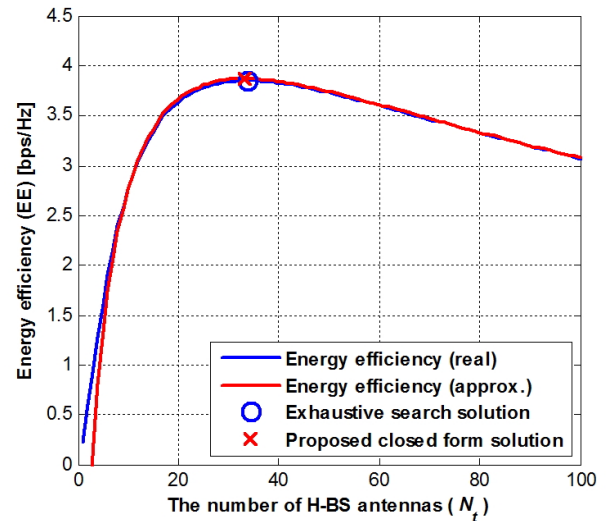


그림 2. 하이브리드 기지국의 안테나 수에 따른 에너지 효율 및 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수

Fig. 2. Energy efficiency under different number of H-BS antennas and optimal solution.

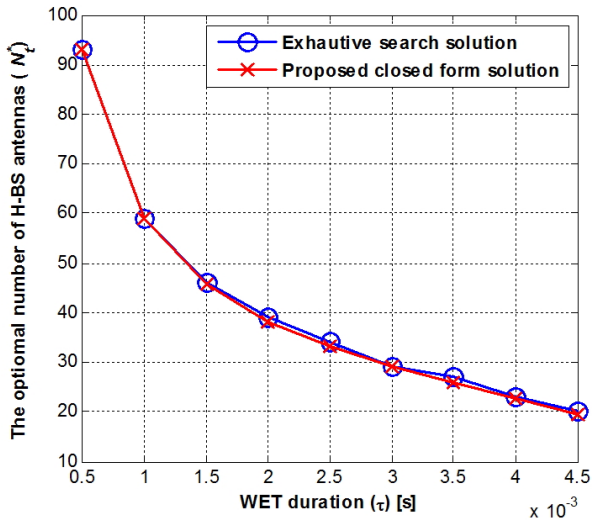


그림 3. 무선 에너지 전송 시간에 따른 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수

Fig. 3. The optimal number of H-BS antennas under different WET duration.

빨간색 엑스는 근사된 에너지 효율 식으로부터 제안하는 closed form 해로 찾은 최적해이다. 먼저, 그림 2로부터 에너지 효율은  $N_t$ 에 대해 quasi-concave이고, 에너지 효율을 최대화하는 최적의  $N_t^*$ 가 존재함을 확인할 수 있다. 또한, 충분히 큰  $N_t$ 에 대해 파란색 실선과 빨간색 점선이 일치하므로 제안하는 기법에서 사용한 가정이 타당함을 확인할 수 있다. 마지막으로 exhaustive search 방법으로 찾은 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수는 34개, 제안하는 closed form 해로부터 찾은 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수는 33개로 오차가 단 1개임을 확인할 수 있다.

그림 3은  $\tau$ 에 따른 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수를 나타낸 그래프이다.  $\tau$ 에 관계없이 exhaustive search 방법으로 찾은 최적의 하이브리드 기지국 안테나 수와 제안하는 closed form 해로부터 찾은 기지국 안테나 수가 최대 1개의 차이만 존재함을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 실험 결과에서 증명한 것과 같이 단일 사용자 WPCN에서 RF chain에서 소모되는 에너지를 고려한 에너지 효율을 향상시키기 위해 최적의 하이브

리드 기지국 안테나 수를 구하였다. 하지만 본 논문은 최소 서비스 품질(quality of service; QoS)과 최대 송신 가능 파워 등의 제약 조건을 고려하지 않았다는 점, 무선 에너지 전송 시간과 송신 파워를 고정된 값으로 두었다는 점에서 한계가 존재하며, 추후 제약 조건과 다중 변수를 고려한 연구로 확장할 수 있다.

## REFERENCES

- [1] A. Rahmati, A. Qian, and L. Zhong, "Understanding Human-Battery Interaction on Mobile Phones", *MobileHCL 2007*, Singapore, Singapore, Sep. 2007.
- [2] E. Yoon, J. Park, and C. Yu, "A Micro Solar Energy Harvesting Circuit with MPPT Control", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol.50, TC, no.6, pp105-113, June 2013.
- [3] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Number of Base Station Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [4] X. Chen, X. Wang, and X. Chen, "Energy-Efficient Optimization for Wireless Information and Power Transfer in Large-Scale MIMO Systems Employing Energy Beamforming," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.2, no.6, pp.667-670, Dec. 2013.
- [5] H. Ju, R. Zhang, "Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.13, no.1, pp.418-428, Jan. 2014.
- [6] O. Arnold, F. Richter, G. Fettweis, and O. Blume, "Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks," *Future Network and Mobile Summit*, Florence, Italy, June 2010.
- [7] S. Choi, D. Kim, and C. Lee, "Optimization of the Number of Active Antennas for Energy-Efficiency in the MIMO Broadcast Channel", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol.51, TC, no.5, pp29-34, May 2014.

## — 저 자 소 개 —



한 용 규(학생회원)  
 2013년 연세대학교 전기전자  
 공학과 학사 졸업.  
 2013년~현재 연세대학교 전기전  
 자공학과 석박사통합과정  
 <주관심분야 : 통신 신호처리,  
 MIMO, 군사전자>



심 동 규(학생회원)  
 2011년 연세대학교 전기전자  
 공학과 학사 졸업.  
 2011년~현재 연세대학교 전기전  
 자공학과 석박사통합과정  
 <주관심분야 : 통신 신호처리,  
 MIMO, 군사전자>



이 충 용(정회원)  
 1987년 연세대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1989년 연세대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 1995년 Georgia Tech. 전자공학  
 과 박사 졸업.

1996년~1997년 삼성전자 선임연구원  
 1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수  
 <주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 협력통신  
 시스템, 군사전자>