

채널 추정 오차가 존재하는 에너지 하베스팅 네트워크에서 SWIPT를 위한 파워 할당 및 분할 알고리즘

이기송¹ · 고정길^{2*}

Power Allocation and Splitting Algorithm for SWIPT in Energy Harvesting Networks with Channel Estimation Error

Kisong Lee¹ · JeongGil Ko^{2*}

¹Department of Information and Telecommunication Engineering, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea

^{2*}Department of Software and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

요 약

차세대 무선 통신 시스템에서는 RF 에너지 하베스팅 기술을 이용하여 센서의 전원 부족 문제를 해결하고자 한다. 본 논문에서는 채널 추정 오차가 존재하는 에너지 하베스팅 네트워크에서 무선 정보 및 전력 동시 전송을 위한 효율적인 알고리즘을 제안하고자 한다. 먼저, 1차원의 완전 검색을 통해 최적의 채널 추정 주기를 찾은 후, MMSE 채널 추정기를 이용하여 채널을 추정한다. 추정된 채널 값을 기반으로, 최소 필요 획득 에너지 조건을 만족시켜주면서 데이터 전송률을 최대화할 수 있는 파워 할당 및 분할 방안을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안 방안은 완벽한 채널 추정을 가정한 최적 방안에 비해 10% 미만의 성능 저하가 있었지만, 기존 방안과 비교할 시에는 데이터 전송률을 20% 이상 향상시킴을 확인 하였다.

ABSTRACT

In the next generation wireless communication systems, an energy harvesting from radio frequency signals is considered as a method to solve the lack of power supply problem for sensors. In this paper, we try to propose an efficient algorithm for simultaneous wireless information and power transfer in energy harvesting networks with channel estimation error. At first, we find an optimal channel training interval using one-dimensional exhaustive search, and estimate a channel using MMSE channel estimator. Based on the estimated channel, we propose a power allocation and splitting algorithm for maximizing the data rate while guaranteeing the minimum required harvested energy constraint. The simulation results confirm that the proposed algorithm has an insignificant performance degradation less than 10%, compared with the optimal scheme which assumes a perfect channel estimation, but it can improve the data rate by more than 20%, compared to the conventional scheme.

키워드 : 에너지 하베스팅 네트워크, 파워 할당 및 분할, 채널 추정 오차

Key word : Energy Harvesting Networks, Power Allocation and Splitting, Channel Estimation Error

Received 12 May 2016, Revised 17 May 2016, Accepted 27 May 2016

* Corresponding Author JeongGil Ko (E-mail: jgko@ajou.ac.kr, Tel:+82-31-219-3815)

Department of Software and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.7.1277>

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 무선 센서 네트워크의 수명 향상을 위해, 센서에서의 효과적인 전력 관리[1]뿐 만 아니라 무선 radio frequency (RF) 신호로부터 전력을 수집하는 RF 에너지 하베스팅 기술에 대한 관심도 높아지고 있다[2, 3]. 이에 따라, RF 신호를 이용하여 무선 정보 및 전력 동시 전송(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)을 위한 방안에 대한 연구 역시 활발히 수행되고 있다[4-7]. [4, 5]에서는 수학적 모델링을 통해 SWIPT의 이론적인 성능 한계를 도출하였다. [6]에서는 순간적인 채널 상황을 고려하여 효율적인 SWIPT를 위한 최적의 파워 분할 (Power splitting) 기법을 제안하였다. 또한, [7]에서는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템에서 에너지 효율성을 최대화하기 위한 SWIPT 알고리즘을 연구하였다. 하지만 기존 연구는 대부분 완벽한 채널 추정 가능성이 가능한 이상적인 가정(Ideal assumption) 아래 제안된 알고리즘으로써, 채널 추정 오차(Channel estimation error)가 존재하는 실제 무선 통신 환경에 직접적으로 적용하기에는 한계가 있다.

본 논문은 채널 추정 오차를 반영한 실제적인 에너지 하베스팅 네트워크(Energy harvesting networks)에서 효율적인 SWIPT를 위한 최적의 채널 추정 주기(Channel training interval)와 파워 할당 및 분할(Power allocation and splitting) 방안을 제안하고자 한다. 먼저, 최소 필요 획득 에너지 조건을 만족시켜주면서 데이터 전송률을 최대화하는 최적화 문제를 도식화 하였다. 본 최적화 문제에서 1차원의 완전 검색(One-dimensional exhaustive search)을 통해 최적의 채널 추정 주기를 찾았다. 또한, 추정된 채널을 기반으로 파워 할당과 분할의 해를 반복적으로 찾는 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안 방안은 시간에 따라 변하는 채널을 높은 정확도로 추정하고, 추정된 채널 값을 이용하여 효율적인 SWIPT를 위해 각 서브채널 별로 파워 할당 및 분할을 수행함을 확인하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 한 개의 송신기

(Transmitter, Tx)와 한 개의 수신기(Receiver, Rx)가 존재하는 N개의 서브채널로 구성된 OFDMA 기반의 점대점(point-to-point) 무선 링크를 고려한다.

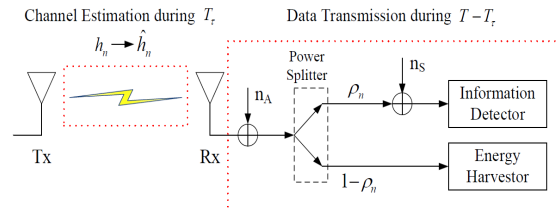


Fig. 1 System model of energy harvesting networks

송신기와 수신기 사이의 무선 채널 h_n 은 이산 시간 블록 페이딩 모델을 가정하며, 채널 상황은 전송 블록 시간 T 동안 변하지 않는다고 가정한다[8, 9]. 각 서브채널은 complex Gaussian distribution을 따르며, 다음과 같이 $h_n \sim CN(0, \sigma_h^2)$ 로 표기한다. 각 서브채널은 독립적이면서 동일한 분포(Independent and Identical Distributed, i.i.d.)를 갖는 임의의 복소 변수라 가정한다. 송신기는 전체 전송 블록 시간 중 주어진 시간 T_t 동안 수신기로부터 트레이닝 신호를 받고, MMSE (Minimum Mean Square Error) 채널 추정기를 이용하여 채널을 추정한다. 추정된 채널은 다음 $\hat{h}_n \sim CN(0, \sigma_{\hat{h}}^2)$ 과 같이 표현한다. $T - T_t$ 동안은 데이터 전송을 수행한다. 또한, 무선 신호 수신시에는 두 종류의 잡음(Noise)이 발생할 수 있다. 첫 번째는 수신 안테나 측에서 발생하는 안테나 잡음 n_A 이며, 두 번째는 신호 처리 중에 발생하는 잡음 $n_s \sim CN(0, 1)$ 이다. 일반적으로 안테나 잡음은 신호처리 잡음보다 매우 작기 때문에 그 값의 크기를 0으로 생각한다[6].

에너지 하베스팅 네트워크의 수신기에는 전력 획득을 위한 모듈을 장착되어 있으며, 송신기로부터 전송된 무선 RF 신호를 이용하여 정보 수신 혹은 전력 획득 둘 중 하나의 용도로 사용할 수 있다. 예를 들어, passive power splitter를 이용하여 각 서브채널마다 수신한 신호의 전력을 일정 비율로 나누어, ρ_n 의 비율은 정보 수신 용도로 사용하고 $1 - \rho_n$ 의 비율은 전력 획득의 용도로 사용할 수 있다[7].

이 경우 달성 가능한 데이터 전송률은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$R = \sum_{n=1}^N r_n = \frac{T - T_r}{T} \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\Omega_r \rho_n p_n |\hat{h}_n|^2}{\Omega_r + \rho_n p_n} \right). \quad (1)$$

여기서 $\Omega_r = 1 + p_r T_r$ 이다. 채널 추정 오차가 존재하는 경우에는 기존의 Shannon capacity와 다르게 [9]에 따라 데이터 전송률에 관한 식이 (1)과 같이 변형된다. 또한, 수신기에서 획득한 에너지는 다음과 같다.

$$Q = \sum_{n=1}^N q_n = \frac{T - T_r}{T} \sum_{n=1}^N \eta (1 - \rho_n) p_n |\hat{h}_n|^2. \quad (2)$$

여기서 η 는 에너지 변환 효율이다. 획득한 에너지는 총 전송시간 $\frac{T - T_r}{T}$ 에서 $1 - \rho_n$ 의 비율동안 송신파워, 채널 이득, 에너지 변환 효율의 곱으로 표현될 수 있다. 이와 같이 정의한 수식을 기반으로 시스템의 최소 필요 획득 에너지를 보장하면서 데이터 전송률을 최대화하기 위한 채널 추정 주기와 파워 할당 및 분할 비율을 찾는 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\vec{T}_r, \vec{p}, \vec{\rho}} \sum_{n=1}^N r_n \\ & \text{subject to C1: } \sum_{n=1}^N q_n \geq Q_m, \text{ C2: } \sum_{n=1}^N p_n \leq P_{\max}, \\ & \text{C3: } p_n \geq 0, \forall n, \text{ C4: } 0 \leq \rho_n \leq 1, \forall n, \\ & \text{C5: } 0 \leq T_r \leq T. \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 $\vec{p} = \{p_1, \dots, p_N\}$ 이고, $\vec{\rho} = \{\rho_1, \dots, \rho_N\}$ 이다. 제약 조건 C1은 수신기의 최소 필요 획득 에너지 Q_m 을 보장해 주기 위한 것이며, 제약조건 C2는 전체 전송 파워는 허용 전송 파워보다 작아야 함을 나타낸다.

III. 제안하는 자원 할당 기법

최적화 문제 (3)에서 먼저 최적의 채널 추정 주기 T_r^* 를 찾아야 한다. 최적화 문제의 목적함수는 T_r 에 대해 concave한 형태가 아니기 때문에 최적화 기법을 이용하여 closed-form 형태로 T_r^* 의 값을 도출하는 것은 불가능하다. 하지만 T_r^* 는 $0 \leq T_r \leq T$ 의 범위 안에 존재하기 때문에 1차원의 완전 검색을 이용하여 찾을 수 있다.

반면, 최적화 문제의 목적함수는 \vec{p} 와 $\vec{\rho}$ 에 대해서는 concave 하다. 그러므로 앞에서 찾은 T_r^* 동안 추정된 채널을 기반으로 \vec{p} 와 $\vec{\rho}$ 의 해를 반복적으로 찾을 수 있다 [10].

먼저, \vec{p} 를 찾기 위해서는 다음의 Lagrangian 함수를 고려해야 한다.

$$A(\vec{p}, \vec{\rho}, \lambda, \mu) = \sum_{n=1}^N r_n + \lambda \left(\sum_{n=1}^N q_n - Q_m \right) + \mu \left(P_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n \right). \quad (4)$$

위 식에서 λ 와 μ 는 음수가 아닌 Lagrangian 계수이다. 수식 (4)을 p_n 에 대해 미분하여 찾은 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건으로부터 다음과 같이 파워 할당 해 p_n 을 구할 수 있다.

$$p_n = \left[\frac{\Omega_r}{\Gamma_n} \sqrt{\frac{4\rho_n |\hat{h}_n|^2 \Gamma_n + (\ln 2) \Omega_r^2 |\hat{h}_n|^4 \psi_n}{(4 \ln 2) \rho_n^2 \psi_n}} - \frac{\Omega_r (1 + \Gamma_n)}{2\rho_n \Gamma_n} \right]^+. \quad (5)$$

수식 (5)에서 $[x]^+ = \max(0, x)$, $\Gamma_n = 1 + \Omega_r |\hat{h}_n|^2$, $\psi_n = \frac{T}{T - T_r} \mu - \lambda \eta |\hat{h}_n|^2 (1 - \rho_n)$ 이다.

이렇게 얻어진 p_n 을 고정된 후, 수식 (4)을 ρ_n 에 대해 미분하여 찾은 KKT 조건으로부터 다음과 같이 파워 분할 해 ρ_n 을 구할 수 있다.

$$\rho_n = \left[\frac{\Omega_r}{\Gamma_n} \sqrt{\frac{4 |\hat{h}_n|^2 \Gamma_n + (\ln 2) \Omega_r^2 \lambda \eta |\hat{h}_n|^6}{(4 \ln 2) p_n^2 \lambda \eta |\hat{h}_n|^2}} - \frac{\Omega_r (1 + \Gamma_n)}{2 p_n \Gamma_n} \right]_0^1. \quad (6)$$

수식 (6)에서 $[x]_0^1 = \min(\max(0, x), 1)$ 이다.

알고리즘 1. 제안하는 알고리즘

Algorithm 1 Proposed Algorithm

- 01: Set $\vec{p}, \vec{\rho}$, and Lagrangian multiplier
- 02: Find $T_r^* = \max_{T_r} R$
- 03: repeat

- 04: Find \vec{p} according to (5)
- 05: Find $\vec{\rho}$ according to (6)
- 06: Update Lagrangian multiplier
- 07: **until** \vec{p} and $\vec{\rho}$ converge

최적화 기법을 이용해 도출한 \vec{p} 와 $\vec{\rho}$ 의 해를 기반으로 제안하는 자원 할당 기법의 동작은 알고리즘 1에 정리되어 있다. 먼저, 송신기는 $\vec{p}, \vec{\rho}, \lambda, \mu$ 를 초기화 한 후, 최적의 채널 추정 주기 T_r^* 을 찾는다. 그 후 도출한 수식 (5)와 (6)에 따라 서브채널에 파워를 할당하고 분할한 뒤, Lagrangian 계수를 업데이트 한다. 파워 할당과 분할의 해 \vec{p} 와 $\vec{\rho}$ 가 iteration이 반복되더라도 특정 값에서 변함이 없는 상황, 즉 동시에 특정 값에 수렴 할 때까지 이와 같은 과정을 반복한다.

IV. 시뮬레이션 결과

MATLAB을 이용한 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에서 사용되는 변수는 다음과 같이 $N = 32, T = 1000, \eta = 0.9, p_r = P_{\max} = 43 \text{ dBm}, Q_m = 20 \text{ dBm}$ 로 설정하였다. 또한, 각 서브채널은 $\sigma_h^2 = 10^{-4}$ 을 갖는 exponentially distributed random variable을 이용하여 생성하였다. 시뮬레이션을 통해 아래에 정의된 3가지 방안들에 대하여 성능을 비교하였다.

- Proposed scheme : 본 논문에서 제안한 기법.
- Optimal scheme : 완벽한 채널 추정 아래 최적의 성능을 달성하는 기존의 제안된 기법.
- Conventional scheme : 각 서브채널마다 동일한 파워를 할당하고, 각 제약조건을 만족시키기 위해 ρ_n 를 조정하는 기법.

그림 2는 각 알고리즘에서 서브채널에 할당되는 파워를 보여준다. Optimal scheme의 경우 water-filing 알고리즘처럼 채널 환경에 비례하여 파워를 할당한다 [11]. 예를 들어, 가장 채널 이득이 높은 서브채널에 파워를 집중적으로 할당하고, 해당 서브채널의 파워를 분할하여 고효율의 에너지 하베스팅을 수행한다.

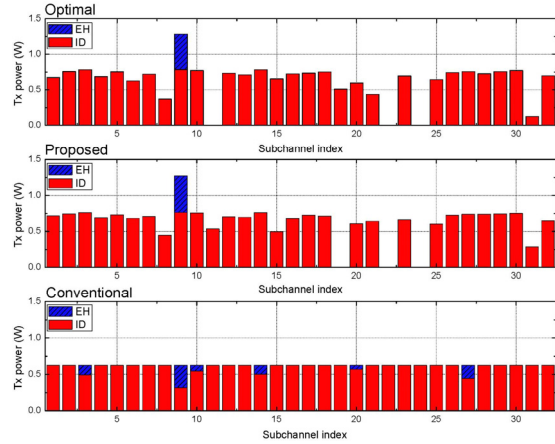


Fig. 2 Power allocation for each algorithm

Proposed scheme의 경우도 채널 추정 오차로 인해 optimal scheme과 약간의 차이는 있지만, 거의 비슷한 형태로 파워를 할당하는 것을 확인할 수 있다. 반면, conventional scheme의 경우 전체 서브채널에 대해 동일한 양의 파워가 할당된다. 채널 이득이 높은 서브채널에 할당된 파워를 분할하여 에너지 하베스팅을 수행하지만, 그럼에도 불구하고 optimal scheme이나 proposed scheme에 비해 효율성은 떨어진다.

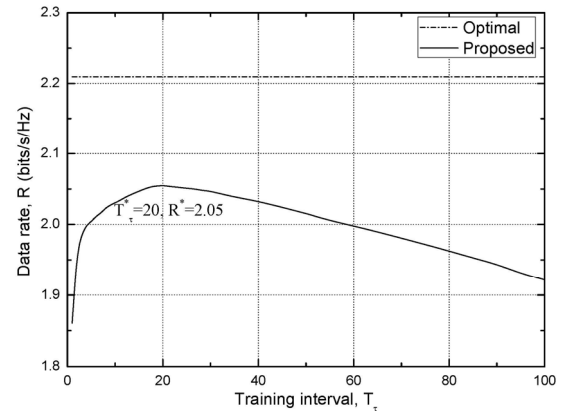


Fig. 3 Data rate vs. Training interval

그림 3는 채널 추정 주기 T_r 에 대한 데이터 전송률 R 을 보여준다. T_r 가 늘어날수록 한 frame에서 채널 추정을 위해 사용하는 시간이 늘어나기 때문에 정확한 채널 추정이 가능해지는 반면, 데이터 전송을 위한 시간은

줄어들게 된다.

그러므로 T_r 은 데이터 전송률 향상 관점에서 채널 추정 정확성 향상과 데이터 전송 시간 감소의 상충효과를 함께 가지고 있다. T_r 이 일정 값까지 증가할 때는 데이터 전송률도 함께 증가하다가, T_r 이 일정 값 이상이 되면 데이터 전송률이 감소하게 된다. Proposed scheme에서 최적의 T_r 값은 20이며, 이때의 데이터 전송률은 2.05 bits/s/Hz이다. 반면 optimal scheme의 경우 항상 완벽한 채널 추정을 가정하고 있기 때문에 T_r 이 변하더라도 데이터 전송률은 변하지 않는다. $T_r=20$ 일 때 optimal scheme과 proposed scheme 사이에는 채널 추정 오차로 인해 10% 미만의 성능 차이가 발생한다.

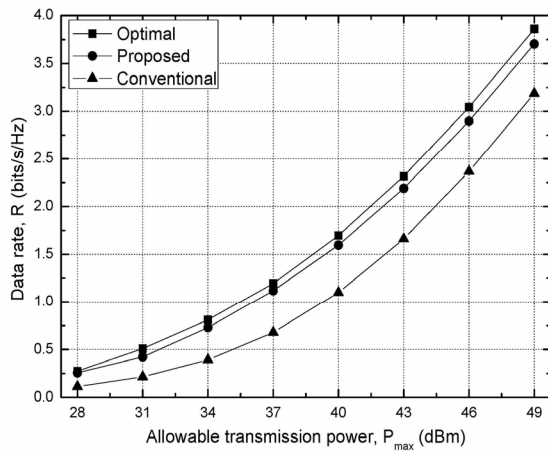


Fig. 4 Data rate vs. Allowable transmission power

그림 4는 $T_r=20$ 일 때의 허용 전송 파워 P_{max} 에 대한 데이터 전송률 R 을 보여준다. P_{max} 가 커질수록 세 방안 모두 큰 전송 파워를 사용할 수 있으므로 데이터 전송률이 상승한다. Proposed scheme의 경우 optimal scheme과 비교 시 10% 미만의 성능 저하를 보이며, 전 P_{max} 구간에 대해 거의 근접한 성능을 보인다. 또한, conventional scheme과 비교 시에는 20% 이상의 성능 향상을 보임을 확인할 수 있다. 이를 통해 proposed scheme은 시간에 따라 변하는 채널을 정확하게 추정하여, 이 값에 따라 각 서브채널 별로 파워 할당 및 분할을 효율적으로 수행함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 채널 추정 오차가 존재하는 에너지 하베스팅 네트워크에서 데이터 전송률을 최대화하기 위해 최적의 채널 추정 주기와 파워 할당 및 분할 방안을 제안하였다. 1차원의 완전 검색을 이용하여 최적의 채널 추정 주기를 찾은 후, 이를 기반으로 각 서브채널 별로 할당되는 파워와 분할 비율 값을 도출하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안 방안은 채널 추정 오차로 인해 최적 방안과 비교할 시 10% 미만의 성능 저하를 보임을 확인하였다. 하지만, 제안방안은 기존 방안에 비해서는 최소 필요 획득 에너지 조건을 만족시켜주면서 동시에 데이터 전송률을 20% 이상 향상시킴을 확인하였다. 본 연구는 추후 실 환경에서 에너지 하베스팅 네트워크를 구현하는데 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (2015R1C1A1A01051747).

REFERENCES

- [1] C. He, B. Sheng, P. Zhu, and X. You, "Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in downlink distributed antenna systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 1, no. 3, pp. 153-156, June 2012.
- [2] M. Pinuela, P. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715-2726, July 2013.
- [3] R. J. M. Vullers, R. V. Schaijk, I. Doms, C. V. Hoof, and R. Merterns, "Micropower energy harvesting," *Solid-State Electronics*, vol. 53, no. 7, pp. 684-693, July 2009.
- [4] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*

- (*ISIT*), pp. 1612-1616, July 2008.
- [5] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets tesla: wireless information and power transfer," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 2363-2367, June 2010.
- [6] L. Liu, R. Zhang, and K. Chua, "Wireless information and power transfer: a dynamic power splitting approach," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 9, pp. 3990-4001, Sep. 2013.
- [7] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 12, pp. 6352-6370, Dec. 2013.
- [8] R. Berry and R. Gallager, "Communication over fading channels with delay constraints," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 5, pp. 1135-1149, May 2002.
- [9] B. Hassibi and B. M. Hochwald, "How much training is needed in multiple-antenna wireless links?," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 4, pp. 951-963, Apr. 2003.
- [10] J. Gorski, F. Pfeuffer, and K. Klamroth, "Biconvex sets and optimization with biconvex functions: a survey and extensions," *Mathematical Methods Operations Research*, vol. 66, no. 3, pp. 373-407, June 2007.
- [11] W. Yu and R. Lui, "Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, no. 7, pp. 1310-1322, July 2006.



이기송(Kisong Lee)

2009년 KAIST 전기및전자공학과 석사
2013년 KAIST 전기및전자공학과 박사
2013년~2015년 ETRI 융합기술연구소 연구원
2015년~현재 국립군산대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : Energy Harvesting Networks, Wireless Power Transfer, Self-Organizing Networks 등



고정길(JeongGil Ko)

2007년 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터학과 학사
2012년 (미) Johns Hopkins University Computer Science 박사
2012년~2015년 ETRI 융합기술연구소 선임연구원
2016년 1월 ~ 현재 대한 임베디드공학회 상임이사
2015년 9월 ~ 현재 아주대학교 정보통신대학 소프트웨어학과 조교수
※관심분야 : Embedded systems, Intelligent systems, Wireless systems 등