

에너지 하베스팅 네트워크에서 SWIPT를 위한 저복잡도를 갖는 파워 할당 및 분할 알고리즘

이기송¹ · 고정길^{2*}

Power Allocation and Splitting Algorithm with Low-complexity for SWIPT in Energy Harvesting Networks

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

RF신호로부터 전력을 수집하는 에너지 하베스팅 기술은 센서의 전원 공급 문제를 해결함으로써 네트워크의 수명을 향상시킬 수 있는 방안으로 최근 큰 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 무선 정보 및 전력 동시 전송을 위한 효율적인 알고리즘을 제안하고자 한다. 먼저, 에너지 하베스팅 네트워크에서 채널의 probability density function을 이용하여 water-level의 하계값을 찾은 후, 이를 기반으로 파워 할당 해를 도출한다. 또한, 최소 필요 획득 에너지 조건을 효율적으로 만족시켜줄 수 있는 파워 분할 방안을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안 방안은 기존 방안에 비해 최소 필요 획득 에너지 조건을 보장하면서 평균 데이터 전송률을 향상시키고, 최적해에 비해서는 10% 미만의 미미한 성능 저하가 있었지만 계산 복잡도를 현저히 줄일 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

Recently, energy harvesting, in which energy is collected from RF signals, has been regarded as a promising technology to improve the lifetime of sensors by alleviating the lack of power supply problem. In this paper, we try to propose an efficient algorithm for simultaneous wireless information and power transfer. At first, we find the lower bound of water-level using the probability density function of channel, and derive the solution of power allocation in energy harvesting networks. In addition, we derive an efficient power splitting method for satisfying the minimum required harvested energy constraint. The simulation results confirm that the proposed scheme improves the average data rate while guaranteeing the minimum required harvested energy constraint, compared with the conventional scheme. In addition, the proposed algorithm can reduce the computational complexity remarkably with insignificant performance degradation less than 10%, compared to the optimal solution.

키워드 : 에너지 하베스팅, 무선 정보 및 전력 동시 전송, 파워 할당 및 분할, 저복잡도

Key word : Energy Harvesting, Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, Power Allocation and Splitting, Low-Complexity

Received 05 April 2016, Revised 06 April 2016, Accepted 18 April 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/jkiice.2016.20.5.917>

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 무선 네트워크에서는 센서의 전원 부족 문제를 해결하고자, radio frequency (RF) 신호로부터 전력을 수집하는 RF 에너지 하베스팅 (Energy harvesting) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다 [1,2]. M. Pinuela et al.은 도시 규모의 실험을 통해 RF 신호로부터 초당 수 μW 의 전력 수집이 가능하다는 것을 검증하였다 [2]. 이에 따라, 최근에는 RF 신호를 이용하여 정보 및 전력 동시 전송(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)을 위한 알고리즘 연구가 활발히 수행되고 있다 [3-6]. L. R. Varshney는 SWIPT의 이론적인 성능 한계를 수학적으로 도출하였다 [3]. L. Liu et al.은 순간적인 직접 채널 및 간접 채널 상황을 고려하여 최적의 SWIPT를 위한 시간 분할 (Time switching) 기법과 파워 분할 (Power splitting) 기법을 제안하였다 [4,5]. K. Lee et al.은 채널추정오차가 존재하는 환경에서 에너지 효율적 SWIPT를 위한 자원할당 기법을 연구하였다 [6].

하지만 기존 연구는 대부분 최적화 이론에 기반한 반복 알고리즘을 이용하여 해를 도출하기 때문에 계산 복잡도가 상당히 크다는 한계가 있다.

본 논문은 에너지 하베스팅 네트워크에서 효율적인 SWIPT를 위한 파워 할당 및 분할 (Power allocation and splitting) 방안을 제안하고자 한다. 먼저, 최소 필요 획득 에너지 조건을 만족시켜주면서 평균 데이터 전송률을 최대화하는 최적화 문제를 도식화 하였다. 하지만 본 최적화 문제의 해를 찾기 위한 계산 복잡도는 상당히 크기 때문에 이를 해결하기 위해 채널의 probability density function (PDF)을 이용한 저복잡도 (Low-complexity) 알고리즘을 제안하였다. 먼저, water-level의 하계값(lower bound)을 근사하고 이를 이용하여 파워 할당 값을 찾은 후, 최소 필요 획득 에너지 조건을 만족시켜 줄 수 있는 효율적인 파워 분할 비율 (Power splitting ratio) 값을 도출하였다. 제안하는 알고리즘에서는 채널 이득에 비례하게 파워를 할당하고, 채널 이득이 큰 경우에 에너지 하베스팅을 적극적으로 수행함으로써 파워 사용 효율을 향상시킨다. 시뮬레이션을 통해 제안 방안은 최적해에 비해 10% 미만의 성능 저하를 보이지만, 계산 복잡도를 현저히 줄일 수 있음을 보인다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 한 개의 송신기 (Transmitter, Tx)와 한 개의 수신기(Receiver, Rx)가 존재하는 point-to-point 무선 링크를 고려한다.

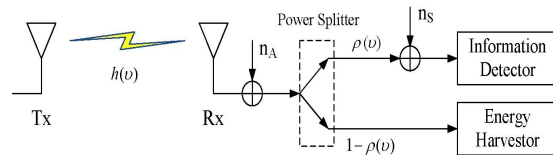


Fig. 1 System model of energy harvesting networks

송신기와 수신기 사이의 무선 채널 $h(v)$ 는 이산 시간 블록 페이딩 모델을 가정하며, 채널 상황은 한 fading state v 동안 변하지 않는다고 가정한다 [7,8]. 채널은 $h_v \sim CN(0, \sigma_h^2)$ 로써, 독립적이면서 동일한 분포 (Independent and Identical Distributed, i.i.d.)를 갖는 임의의 복소 변수라 가정한다. 또한, 각각의 v 에서 송신기는 채널 정보를 정확히 알고 있다고 가정한다[5,6]. 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, power splitter를 이용하여 fading state v 에서 받은 무선 신호의 전력을 일정 비율로 나누어, 전체 전력 중 $\rho(v)$ 의 비율은 정보 수신 용도로 사용하고 전체 전력 중 $1-\rho(v)$ 의 비율은 전력 획득 용도로 사용할 수 있다. 또한, 무선 신호 수신시에는 두 종류의 잡음(Noise)이 발생할 수 있다. 첫 번째는 수신 안테나 측에서 발생하는 안테나 잡음 $n_A \sim CN(0, \sigma_A^2)$ 이며, 두 번째는 신호 처리 중에 발생하는 잡음 $n_S \sim CN(0, \sigma_S^2)$ 이다. 일반적으로 n_A 는 n_S 보다 매우 작기 때문에 그 값의 크기를 $\sigma_A^2 = 0$ 로 생각한다 [6]. 이 경우 달성 가능한 데이터 전송률은 $r(v) = \log_2(1 + \rho(v)p(v)\gamma(v))$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $\gamma(v) = \frac{|h(v)|^2}{\sigma_S^2}$ 이고, $p(v)$ 는 송신기의 전송 파워이다. 획득 에너지는 $q(v) = \eta(1 - \rho(v))p(v)|h(v)|^2$ 로 나타낼 수 있으며, η 는 에너지 변환 효율이다. 또한, $E_v(\cdot)$ 는 v 에 대한 평균값이라고 정의한다.

이와 같이 정의한 수식을 기반으로 시스템의 최소 필요 획득 에너지를 보장하면서 평균 데이터 전송률을 최대화하기 위한 파워 할당 및 분할 비율을 찾는 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\max_{p, \rho} E_v(r(v)) \quad (1)$$

subject to C1: $E_v(q(v)) \geq Q_m$, C2: $E_v(p(v)) \leq P_a$,
C3: $p(v) \geq 0, \forall v$, C4: $0 \leq \rho(v) \leq 1, \forall v$.

여기서 $\vec{p} = \{p(1), \dots, p(v)\}$ 이고, $\vec{\rho} = \{\rho(1), \dots, \rho(v)\}$ 이다. 제약조건 C1은 수신기의 최소 필요 획득 에너지 Q_m 을 보장해 주기 위한 것이며, 제약조건 C2는 평균 전송 파워는 허용 전송 파워보다 작아야 함을 나타낸다.

III. 제안하는 자원 할당 기법

Lagrangian duality를 이용하여 최적화 문제 (1)을 반복적으로 풀면 최적의 해를 찾을 수 있지만 [6], 계산 복잡도가 상당히 커서 실제 알고리즘 구현 측면에서는 한계가 있다. 그러므로 본 논문에서는 최적의 해가 water-filling 파워 할당[9]과 비슷한 형태를 갖는다는 사실을 이용하여, 다음과 같이 복잡도가 낮은 파워 할당 및 분할 방안을 제안하고자 한다.

먼저, 채널의 PDF는 exponential distribution을 따른다는 사실과 제약 조건 C2를 이용하면, water-level λ 를 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_a &= E_v \left[\left(\lambda - \frac{1}{\gamma(v)} \right)^+ \right] \\ &= \int_0^\infty \left(\lambda - \frac{1}{\sigma^2 x} \right)^+ e^{-x} dx \\ &= \int_{\frac{1}{\sigma^2 \lambda}}^\infty \left(\lambda - \frac{1}{\sigma^2 x} \right) e^{-x} dx \\ &= \lambda e^{-\frac{1}{\sigma^2 \lambda}} - \frac{1}{\sigma^2} Ei \left(\frac{1}{\sigma^2 \lambda} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 σ^2 는 normalize된 채널 분산 값으로써 $\sigma^2 = \frac{\sigma_h^2}{\sigma_s^2}$ 로 정의되며, $Ei(\cdot)$ 는 exponential integral 함수이다. $Ei(\cdot)$ 는 다음과 같은 한계 범위를 갖는다.

$$\frac{1}{2} e^{-\frac{1}{\sigma^2 \lambda}} \ln(1+2\sigma^2 \lambda) < Ei \left(\frac{1}{\sigma^2 \lambda} \right). \quad (3)$$

결과적으로 수식 (2)와 (3)에 따라, P_a 는 다음과 같은 한계 범위를 갖게 된다.

$$\begin{aligned} P_a &< e^{-\frac{1}{\sigma^2 \lambda}} \left(\lambda - \frac{1}{2\sigma^2} \ln(1+2\sigma^2 \lambda) \right) \\ &< \lambda - \frac{1}{2\sigma^2} \ln(1+2\sigma^2 \lambda). \end{aligned} \quad (4)$$

수식 (4)로부터 water-level의 하계값 λ_L 은 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\lambda_L = -\frac{1}{2\sigma^2} \left(W_{-1} \left(-e^{-\sigma^2 \left(2P_a + \frac{1}{\sigma^2} \right)} \right) + 1 \right) < \lambda. \quad (5)$$

채널의 PDF를 이용하여 얻은 파워 할당 값은 최종적으로 제약조건 C2를 만족해야하므로, water-level의 하계값을 이용하여 다음 수식 (6)과 같이 water-filling 형태로 표현할 수 있다.

$$p(v) = \left[\lambda_L - \frac{1}{\gamma(v)} \right]^+. \quad (6)$$

여기서 $[x]^+ = \max(0, x)$ 이다.

다음으로 파워 분할 비율 $\rho(v)$ 를 결정한다. 먼저, 제약조건 C1에 따라 fading state v 까지의 평균 획득 에너지는 Q_m 과 같아야 하므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Q_m = \frac{\sum_{j=1}^{v-1} q(j)}{v} + \frac{\eta(1-\rho(v))p(v)|h(v)|^2}{v}. \quad (7)$$

수식 (7)에서부터 $\rho(v)$ 는 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\rho(v) = \max \left\{ \left[1 - \frac{vQ_m - \sum_{j=1}^{v-1} q(j)}{\eta p(v)|h(v)|^2} \right]^+, \rho_m \right\}. \quad (8)$$

수식 (8)에서 ρ_m 은 파워 분할 비율의 하계값이다. 채널 상황이 좋지 않아 채널 이득 값이 극단적으로 작은 경우에는, 수신기가 전력 획득보다는 정보 수신을 하는

것이 시스템의 성능 향상 측면에서 더 이득이다. 그러므로 작은 채널 이득 상황에서는 순간적으로 Q_m 이 만족되지 않더라도 일단 정보를 수신한 후, 채널 이득이 큰 상황에서 획득 에너지를 늘려 평균 획득 에너지를 Q_m 에 맞추는 과정이 필요하다. 하지만 $\rho(v)$ 의 하계값이 0으로 설정 되는 경우에는, 채널 이득이 작은 경우에도 제약조건 C1을 만족시켜 주기 위해 비효율적으로 에너지 하베스팅을 수행할 수 있다. 이러한 상황을 방지하기 위해 $\rho(v)$ 의 하계값을 0이 아닌 ρ_m 으로 설정해야만 한다.

다음으로 최적해와 제안 방안의 계산 복잡도를 비교하고자 한다. 총 T개의 fading state를 고려한다고 가정할 때, 일반적으로 water-filling 파워 할당의 해를 구하기 위한 계산 복잡도는 $T \log_2 T$ 이다. 총 I번의 반복 과정을 통해 최적의 $p(v)$ 와 $\rho(v)$ 를 joint하게 찾았다면, 최적해를 찾기 위해서는 $O(I(T \log_2 T))$ 의 계산 복잡도가 필요하다. 반면, 제안하는 파워 할당의 경우, 미리 알려진 채널의 PDF 정보를 이용하여 수식 (5)에 따라 water-level의 하계값을 근사하고 각 fading state마다 할당되는 파워의 양을 결정하므로 반복 수행 과정이 필요 없다. 즉, 제안 방안의 경우 $O(1)$ 의 매우 낮은 계산 복잡도를 가짐으로써, 최적해에 비해 구현이 용이하고 실시간 동작이 가능한 장점이 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 사용되는 변수는 다음과 같이 $\eta = 1$ [5], $P_a = 43 \text{ dBm}$, $g_{\min} = 10 \text{ dBm}$, $\sigma^2 = 5$, $\rho_m = 0.9$ 로 설정하였다. 또한, 채널은 각 fading state 당 Rayleigh fading을 가정하며, 평균 1을 갖는 exponentially distributed random variable을 이용하여 생성하였다 [5]. 시뮬레이션을 통해 다음에 정의된 3가지 방안들에 대하여 성능을 비교하였다.

- Proposed scheme : 본 논문에서 제안한 기법.
- Optimal scheme : 최적의 성능을 달성하는 기법.
- Conventional scheme : 각 fading state마다 동일한 파워를 할당하고, 제약조건 C1-C4를 만족시키기 위해 $\rho(v)$ 를 조정하는 기법.

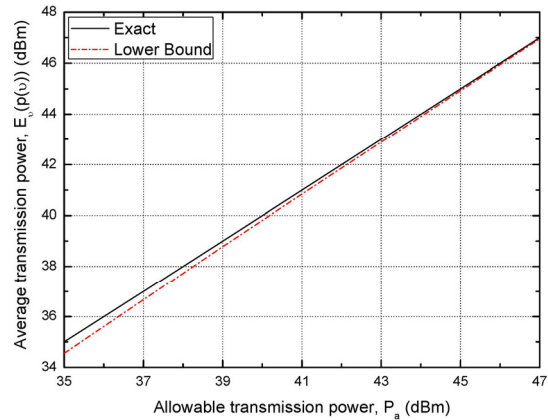


Fig. 2 Average transmission power vs. Available transmission power

그림 2는 허용 전송 파워 P_a 에 대한 송신기에서 사용되는 평균 전송 파워 $E_v(p(v))$ 를 보여준다. Proposed scheme을 이용하여 찾은 water-level의 하계값은 정확한 경계값(exact bound)과 거의 근사함을 알 수 있으며, P_a 가 늘어날수록 하계값과 정확한 경계값 사이의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

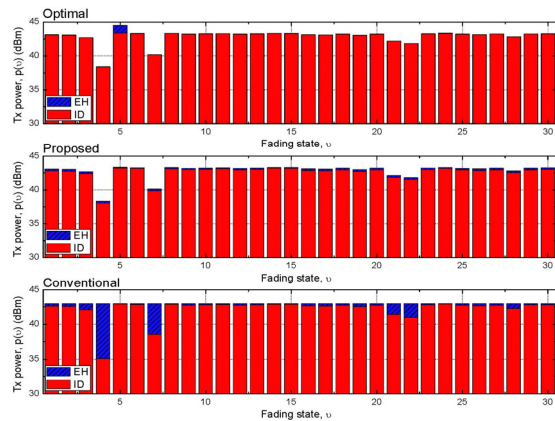


Fig. 3 Power allocation for each algorithm

그림 3은 각 알고리즘에서 30개의 fading state에 대해 할당되는 파워를 보여준다. Optimal scheme의 경우 가장 채널 환경이 좋은 경우에 파워를 집중적으로 할당하고, 이때 파워를 분할하여 에너지 하베스팅을 수행한다. 즉, 채널 이득이 가장 클 때 고효율로 에너지를 획득하여 제약조건 C1을 만족시켜주는 것이 최적임을 보여

준다.

Proposed scheme의 경우 채널 환경에 비례하게 할당되는 파워의 양이 결정된다. 또한, 채널 환경이 좋지 않은 경우에는 최대 할당되는 전송 파워의 $1 - \rho_m = 0.1$ 에 해당하는 비율만 에너지 하베스팅에 사용되고, 부족한 획득 에너지는 채널이 좋은 경우에 보충한다. 이를 통해 정보 수신과 전력 획득을 위해 파워를 효율적으로 사용할 수 있다. 반면, conventional scheme의 경우 전체 fading state에 대해 동일한 양의 파워가 할당된다. 또한, 각 fading state마다 Q_m 을 보장해주기 위하여, $v=4$ 와 같이 채널 환경이 좋지 않은 경우에도 많은 양의 파워를 이용하여 에너지 하베스팅을 수행하므로 파워 사용의 효율성이 떨어지게 된다.

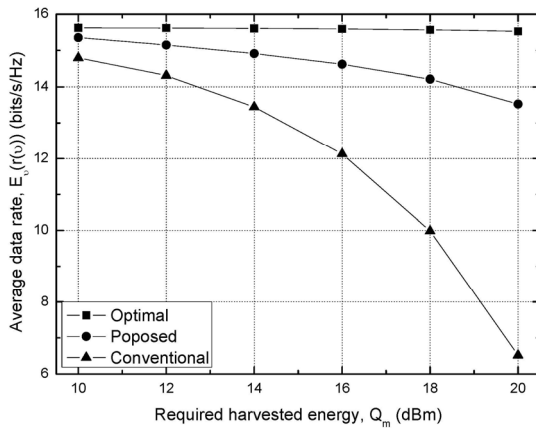


Fig. 4 Average data rate vs. Required harvested energy

그림 4는 최소 필요 획득 에너지 Q_m 에 대한 평균 데이터 전송률 $E_v(r(v))$ 를 보여준다. Q_m 이 늘어날수록 상대적으로 정보 수신에 사용되는 파워가 줄어들게 되므로 세 방안 모두 $E_v(r(v))$ 가 감소한다. 그림 3의 결과에서 볼 수 있듯이, conventional scheme의 경우 Q_m 이 늘어남에 따라 SWIPT를 위해 파워를 효율적으로 사용하지 못하므로 optimal scheme과 비교하여 $Q_m = 20 \text{ dBm}$ 에서 50%이상의 성능 저하가 발생한다. 반면, proposed scheme의 경우 optimal scheme과 비교하여 계산 복잡도를 현저하게 줄임에 비해 $Q_m = 20 \text{ dBm}$ 에서 10% 미만의 성능 저하만을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 네트워크에서 평균 데이터 전송률을 최대화하기 위해 복잡도가 낮은 파워 할당 및 분할 방안을 제안하였다. 채널의 PDF를 이용하여 water-level의 하계값을 근사하고, 이를 통해 water-filling 형태의 파워 할당 해를 도출하였다. 또한, 최소 필요 획득 에너지를 만족시켜 줄 수 있는 효율적인 파워 분할 비율 값을 도출하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안 방안이 기존 방안에 비해 최소 필요 획득 에너지 조건을 만족시켜주면서 동시에 평균 데이터 전송률을 향상시킴을 확인하였다. 또한, 제안 방안은 최적 해와 비교할 시 10% 미만의 성능 저하를 보이지만, 계산 복잡도를 $O(I \log_2 T)$ 에서 $O(1)$ 로 낮출 수 있음을 확인하였다.

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] Study on enhancements for MTC, 3GPP TR Std. TR 22.888, v.0.4.0, 2011.
- [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] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in Proc. *IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 1612-1616, July 2008.
- [4] L. Liu, R. Zhang, and K. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 288-300, Jan. 2013.
- [5] 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.
- [6] K. Lee and J.-P. Hong, "Energy efficient resource allocation for simultaneous information and energy transfer with imperfect channel estimation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 4, pp. 2775-2780, Apr. 2016.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.



이기승(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