

## 정보와 전력의 동시 전송을 최대화하기 위한 자원 관리 기법

이 기 송\*, 김 민 호\*, 조 동 호\*

## Resource Management for Maximizing Simultaneous Transfer of Information and Power

Kisong Lee\*, Minhoe Kim\*, Dong-Ho Cho\*

## 요 약

차세대 무선 통신 시스템에서는 효율적인 전력 사용을 위해서 서비스를 받지 않는 수신기는 송신기로부터 전송되는 신호를 이용하여 전력을 획득할 수 있는 환경을 고려하고 있다. 본 논문에서는 최적화 기법을 이용하여 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 동시에 최대화할 수 있는 서브 채널 및 파워 할당 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통하여 제안 기법은 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 균형있게 증가시킴을 보였다. 특히, 제안 기법은 기존 기법에 비해 미미한 데이터 전송률 저하를 보이지만 전력 획득량은 크게 증가시켜 효율적인 전력 사용을 가능하게 함을 보였다.

**Key Words** : Simultaneous Transfer of Information and Power, Energy Harvesting, Indoor Wireless Communication Systems, Resource Management

## ABSTRACT

To enable the efficient use of energy, the environment where unscheduled receivers can harvest energy from the transmitted signal is considered in next-generation wireless communication systems. In this paper, we propose a scheme for allocating subchannel and power to maximize the system throughput and harvested energy simultaneously using optimization techniques. Through simulations, we verify that the proposed scheme can increase the system throughput and harvested energy harmoniously. In particular, the proposed scheme improves the harvested energy remarkably with a negligible degradation of system throughput, compared with conventional scheme, as a result, energy can be used efficiently in the system.

## 1. 서 론

최근 무선 통신 시스템에서는 높은 통신 용량이 요구됨과 동시에 효율적인 전력 관리의 중요성이 커지

고 있다. 효율적인 전력 관리를 위해 배터리 이외의 자연 환경에서 버려지는 전력을 수집하는 방법이 그 해결책으로 대두되고 있다. 특히 RF (radio frequency) 신호로부터 오는 전력은 기존의 정보 전송

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음.[14-000-04-001, 초연결 스마트 모바일 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심기술 개발]

• First Author : Department of Information and Telecommunication Engineering, Kunsan National University, kslee851105@gmail.com, 정회원

◦ Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), dhcho@kaist.ac.kr, 종신회원

\* Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), mhkim@comis.kaist.ac.kr  
논문번호 : KICS2015-05-144 Received May 7, 2015; Revised July 24, 2015; Accepted July 30, 2014

을 위해 사용되던 안테나를 이용하여 획득이 가능하므로 압력, 열, 바람 등과 같은 에너지원으로부터 전력을 획득하는 것과 비교해 상대적으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다<sup>[1]</sup>. RF 신호를 이용해 전력을 획득하는 방법에 대한 연구는 현재 활발히 진행 중이다<sup>[2-14]</sup>. [2,3]에서는 정보와 전력을 동시에 전송했을 때의 이론적인 성능 한계를 수학적으로 보였다. [4]에서는 정보와 전력을 수신하기 위한 시간 스위칭 (time switching) 기반 수신기 구조와 전력 분배 (power splitting) 기반의 수신기 구조에 대해 연구하였다. [5]에서는 임의로 공급되는 에너지원과 채널의 상태 변화를 고려하여 일정량의 전력 획득량을 보장하면서 통신 용량을 최대화 할 수 있는 최적의 전송 기법에 대한 연구를 수행하였다. [6,7]에서는 정보와 전력의 동시 전송에 있어서 간섭 채널의 영향을 분석하였다. [8,9]에서는 에너지 하베스팅을 이용한 단말을 운용할 때 에너지 효율 최대화할 수 있는 방안을 제시했다. [10]에서는 클러스터 센서 네트워크에서 클러스터링 크기와 에너지 효율성의 관계를 분석하였다. [11,12]에서는 분산형 네트워크에서 정보와 전력 동시 전송을 위한 relay 프로토콜 및 operation rule에 대한 연구를 진행하였다. [13,14]에서는 cognitive radio 시스템에서 primary 시스템으로부터 오는 RF 신호를 이용하여 opportunistic하게 전력을 하베스팅 하는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 시스템 관점에서 다수의 수신기가 존재하는 환경에서 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 균형적으로 동시에 최대화하기 위한 방안에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 논문에서는, 서비스를 받지 않는 수신기가 송신기로부터 전송되는 RF 신호를 이용하여 전력을 획득할 수 있는 환경을 고려하고, 본 환경에서 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 동시에 최대화하기 위한 자원 관리 기법을 제안한다. 제안하는 자원 관리 기법은 최적화 (optimization) 기법을 이용해 서브 채널과 파워 할당 해를 찾고, 이를 기반으로 반복적으로 (iteratively) 서브 채널을 사용자에게 할당하고 각각의 서브 채널마다 파워를 할당한다. 제안 기법에서는 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 동시에 고려하여 두 값 중 어느 한 값의 비중이 커지는 것을 방지하며, 두 값이 균형적으로 최대화 될 수 있는 방향으로 서브 채널 및 파워를 할당한다. 제안하는 자원 관리 기법을 통해 시스템의 데이터 용량을 늘릴 수 있을 뿐만 아니라 효율적인 전력 사용이 가능하다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 N개의 서브 채널로 구성된 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기반의 다중 수신기 (multi-receiver)가 존재하는 실내 시스템에서 효율적으로 정보와 전력을 동시에 전송하기 위한 자원 관리 기법을 고려한다. 송신기 (Transmitter, Tx)는 한 개의 전 방향성 안테나 (omni-directional antenna)으로 구성되고, 각각의 수신기 (Receiver, Rx) 역시 한 개의 전 방향성 안테나를 이용한다고 가정한다.

그림 1은 정보와 전력을 동시에 전송할 수 있는 실내 무선통신 시스템을 보여 준다. 여기에서 Tx가 전송하는 RF 신호는 Rx 측에서 정보 전송 혹은 전력 획득 둘 중 하나의 용도로 사용될 수 있다. 그러므로 서브 채널을 할당받은 Rx는 해당 서브 채널을 통해 정보를 전송 받으며, 서브 채널을 할당받지 못한 나머지 Rx들은 이 RF 신호를 이용하여 전력을 획득한다.

Tx에서는 각 서브 채널의 채널품질정보 (channel quality information, CQI)를 정확하게 획득할 수 있으며, 이 정보를 이용하여 Rx의 서비스 지원을 위한 서브 채널 및 파워를 할당한다. 각 서브 채널은 단일 Rx에 의해서만 사용되며, 실내 Rx의 움직임은 느려 채널의 CQI는 패킷 전송 시간동안 변하지 않는다고 가정한다<sup>[15]</sup>. 본 논문에서 사용된 기호 표기법은 다음과 같다.

- N, K 는 각각 전체 서브 채널의 수, 전체 Rx의 수.

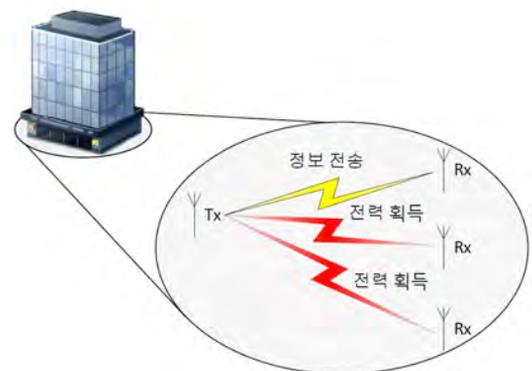


그림 1. 정보와 전력 전송을 동시에 전송하는 실내 무선통신 시스템.  
Fig. 1. Indoor wireless communication system for simultaneous transfer of information and power.

- $s_{n,k}$  는 Rx k에게 서브 채널 n이 할당 되었는 지를 나타내는 지표. 예를 들어 Rx k에게 서브 채널 n이 할당된 경우에는  $s_{n,k} = 1$ 이며, 그렇지 않은 경우에는  $s_{n,k} = 0$ 으로 표시.
- $p_n$  는 서브 채널 n에 할당하는 파워.
- $\vec{s}, \vec{p}$  는 각각  $s_{n,k}$ 와  $p_n$ 의 집합.
- $\eta_k$  는 Rx k에서의 전력 변환 효율.
- $|h_{n,k}|^2$  는 서브 채널 이득.
- $\sigma^2$  는 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 파워.
- $p_{\max}$  는 Tx에게 허용된 전송에 사용할 수 있는 최대 파워.

위의 표기법을 이용하여 Rx k에게 서브 채널 n이 할당된 경우의 데이터 전송률은  $r_{n,k} = \log_2(1 + p_n \gamma_{n,k})$  으로 나타낼 수 있으며, 여기서  $\gamma_{n,k} = \frac{|h_{n,k}|^2}{\sigma^2}$  이다. 또한, 시스템의 총 데이터 전송률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R(\vec{s}, \vec{p}) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N s_{n,k} \log_2(1 + p_n \gamma_{n,k}) \quad (1)$$

아울러, 시스템 총 전력 획득량은 dBm 단위로 다음과 같이 표현된다.

$$E(\vec{s}, \vec{p}) = 10 \log_{10} \left( \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (1 - s_{n,k}) \eta_k p_n |h_{n,k}|^2 \right). \quad (2)$$

수식 (2)에서 에너지 보존 법칙에 의해 다음의 조건  $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \eta_k |h_{n,k}|^2 \leq 1$  을 만족해야 한다<sup>[16]</sup>. 본 논문에서는 정보와 전력을 동시에 최대화하기 위하여 다음과 같은 목적함수를 정의한다.

$$U(\vec{s}, \vec{p}) = R(\vec{s}, \vec{p}) + E(\vec{s}, \vec{p}). \quad (3)$$

위의 수식에 기반하여 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 최대화 하는 자원 할당 기법을 찾는 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\max_{\vec{s}, \vec{p}} U(\vec{s}, \vec{p}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{subject to C1: } & \sum_{k=1}^K s_{n,k} \leq 1 \text{ for } \forall n \\ \text{C2: } & s_{n,k} \in \{0, 1\} \text{ for } \forall n, k \\ \text{C3: } & \sum_{n=1}^N p_n \leq p_{\max} \\ \text{C4: } & p_n \geq 0 \text{ for } \forall n. \end{aligned}$$

최적화 문제 (4)에서 제약 조건 C1과 C2는 하나의 서브 채널이 하나의 Rx에게만 할당될 수 있음을 보여준다. 제한 조건 C3과 C4는 각각의 서브 채널에 할당되는 파워는 0보다 크거나 같으며, 모든 서브 채널에 할당된 파워의 합은  $p_{\max}$  을 초과할 수 없음을 보여준다. 하지만 최적화 문제 (4)는 mixed-integer linear 문제이므로 최적의 해를 찾기가 어렵다. 그러므로 제한 조건 C2를 binary 값에서 다음과 같이 real 값을 갖도록  $0 \leq s_{n,k} \leq 1$ , for  $\forall n, k$ 로 제한 조건을 완화하여 문제의 해를 구한다.

### III. 효율적인 정보와 전력 동시 전송 기법

제안하는 자원 할당 방안은 서브 채널 할당과 파워 할당으로 이루어져 있다. 서브 채널 및 파워 할당 값을 찾기 위해서는 최적화 문제 (4)의 Lagrangian 함수를 고려하여야 한다.

$$\begin{aligned} A(\vec{s}, \vec{p}, \vec{\lambda}, \mu) \\ = U(\vec{s}, \vec{p}) + \sum_{n=1}^N \lambda_n \left( 1 - \sum_{k=1}^K s_{n,k} \right) + \mu \left( p_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n \right). \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ 이고  $\vec{\lambda}$ 와  $\mu$ 는 음수가 아닌 Lagrangian 계수이다.

먼저, 서브 채널 할당 해를 찾기 위해서 수식 (5)를  $s_{n,k}$ 에 대해서 미분한 후 상수항을 제거하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial A}{\partial s_{n,k}} = \frac{-\eta_k p_n |h_{n,k}|^2}{\ln 10 / 10 (E'_{mW})} + \log_2(1 + p_n \gamma_{n,k}). \quad (6)$$

여기서  $E'_{mW}$ 는 이전 time slot까지의 mW 단위의 평균적인 시스템 총 전력 획득량이다. 수식 (6)은 서브 채널 n을 Rx k에 할당함으로써 얻을 수 있는 성능 이득이다. 그러므로 수식 (7)과 같이 가장 큰 성능 이득을 갖는 Rx에게 서브 채널을 할당하면 목적함수가 최대가 될 수 있다.

$$k^* = \arg \max_k \frac{\partial \Lambda}{\partial s_{n,k}}. \quad (7)$$

서브 채널이 할당될 확률은 Rx k의 달성 가능한 데이터 전송률인  $\log_2(1+p_n \gamma_{n,k})$ 에 비례하며, 달성 가능한 전력 획득량인  $\eta_k p_n |h_{n,k}|^2$ 에 반비례한다. 이에 대한 해석은 다음과 같다. (i) 데이터 전송률을 올리기 위해 각각의 서브 채널은 가장 큰 데이터 전송률을 달성할 수 있는 Rx에게 할당되어야 한다. (ii) 반면에 가장 작은 전력 획득량을 달성할 수 있는 Rx에 서브 채널이 할당 되어야 나머지 Rx들이 많은 양의 전력을 획득할 수 있으므로 시스템 측면에서 총 전력 획득량을 증가시킬 수 있다. 기본적으로 데이터 전송률과 전력 획득량은 채널 이득에 비례하므로, 서브 채널 할당 조건인 (i)과 (ii)는 서로 상충되는 것으로 보인다. 하지만 제안 방안의 경우 (i)과 (ii)를 종합적으로 고려하여 데이터 전송률과 전력 획득량을 균형적으로 증가시키는 방향으로 서브 채널을 할당한다.

다음으로, Tx는 서브 채널이 할당된 Rx 집합  $\vec{s}$ 에 대하여 서브 채널 별로 파워 할당을 수행한다. 파워 할당 해는 수식 (5)를  $p_n$ 에 대해서 미분하여 구한 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_n = \left\{ \frac{1}{\ln 2 \left( \mu - \sum_{k \neq k^*} \frac{\eta_k |h_{n,k}|^2}{\ln 10 / 10 (E'_m W)} \right)} - \frac{1}{\gamma_{n,k^*}} \right\}^+. \quad (8)$$

수식 (8)에서  $[x]^+ = \max(0, x)$ 이며, 파워 할당의 의미는 다음과 같다. 기본적으로 water-filling 파워 할당과 비슷하게 서브 채널의 SNR(Signal-to-Noise Ratio)인  $\gamma_{n,k}$ 이 높을수록 많은 양의 파워가 할당된다. 이를 통해 시스템의 데이터 전송률을 높일 수 있다. 또한, 서브 채널을 할당받지 못한 Rx로부터 획득되는 전력량에 비례하는  $\sum_{k \neq k^*} \eta_k |h_{n,k}|^2$  값이 클수록 해당 서브 채널에 많은 양의 파워가 할당되는데, 이를 통해 시스템의 전력 획득량을 높일 수 있다. 그러므로 제안하는 파워 할당의 두 가지 특성을 이용하여 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 동시에 향상시킬 수 있다.

할당된 서브 채널과 파워  $\vec{s}$ 와  $\vec{p}$ 를 기준으로 Lagrangian 계수는 bisection 기법 혹은 gradient 알고리즘을 통해 업데이트 될 수 있다. Bisection 기법은

Lagrangian 계수가 존재하는 구간을 반으로 나눈 후 실제 Lagrangian 계수가 존재하는 영역을 반복적으로 선택한다. 선택된 구간에서 KKT 조건이 만족하는지를 판별하고 KKT 조건이 만족하는 경우의 값을 Lagrangian 계수로 사용한다. 반면, gradient 알고리즘에서는 다음과 같은 수식 (9)을 통해 매 주기마다 Lagrangian 계수가 업데이트 되며, 현재 주기의 Lagrangian 계수와 이전 주기의 Lagrangian 계수의 차이가 일정 값 이하인 경우 업데이트를 멈춘다.

$$\mu^{(i)} = \left[ \mu^{(i-1)} - a \left( p_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n \right) \right]. \quad (9)$$

제안하는 효율적인 정보와 전력 동시 전송 기법의 동작은 알고리즘 1에 정리되어 있다. 제안하는 알고리즘의 계산 복잡도는  $O(I(KN + \text{Mlog}_2 N))$ 이다. 여기에서  $O(KN)$ 은 서브 채널 할당 해  $\vec{s}$ 를 찾는 복잡도이며,  $O(\text{Mlog}_2 N)$ 은 water-filling 계열의 파워 할당 해  $\vec{p}$ 를 찾는 복잡도이다. 또한,  $I$ 는  $\vec{s}$ 와  $\vec{p}$ 가 동시에 수렴하는데 필요한 iteration 횟수이다.)

알고리즘 1. 제안하는 자원 할당 방안  
Algorithm 1. Proposed Resource Allocation

- Initialization
- 01: Initialize  $\vec{s}$  and  $\vec{p}$
- Resource allocation
- 02: repeat
- 03: Find  $\vec{s}$  according to (7)
- 04: Find  $\vec{p}$  according to (8)
- 05: Update Lagrangian multiplier
- 06: until  $\vec{s}$  and  $\vec{p}$  converge jointly

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 성능 평가를 위해 32개의 서브 채널을 갖는 실내 무선 통신 시스템을 고려하였다. Tx의 전체 전송 파워는 15 dBm부터 30 dBm까지 3 dBm 씩 변화시켰으며, Tx로부터 5 m에서 15 m 사이의 거리에 각각 3개, 5개의 Rx들을 임의 발생시켰다. 전력 변환 효율은  $\eta_k = 0.25$ 이며<sup>[17]</sup>, 노이즈 파워는 -174 dBm/Hz이다. 중심 주파수는 차세대 Wi-Fi system에

1) Bisection 기법 사용 시 제안 알고리즘은 10회 이내의 iteration 횟수 안에서  $\vec{s}$ 와  $\vec{p}$ 가 동시에 수렴한다.

서 사용될 470 MHz로 정했으며, 대역폭은 10 MHz 이다<sup>[18]</sup>. Pathloss 모델은 TGn 모델을 사용했으며<sup>[19]</sup>, 무선 채널은 Rician 페이딩에 기반한 주파수 플랫폼 채널을 가정하였다.

시뮬레이션을 통해 다음에 정의된 3가지 방안들에 대하여 성능을 비교하였다.

- 최적해 (Optimal solution) : 모든 조합의 서브 채널 할당과 파워 할당을 고려하여 exhaustive search를 통해 찾은 해.
- 제안 방안 (Proposed scheme) : 본 논문에서 제안한 기법.
- 기존 방안 (Conventional scheme) : Tx는 시스템의 총 데이터 전송률을 최대화하는 방향으로 서브 채널 및 파워를 할당

표 1은 작은 규모의 네트워크에서 제안한 방식 및 기존 방식의 성능과 최적해와의 성능 비교를 보여준다. 모든 경우의 수를 고려해야 하는 최적해를 찾기 위한 계산 복잡도는  $O(I(K^N \text{Mlog}_2 N))$ 로 매우 크므로, 최적해를 찾기 위해  $K=2, N=2$ 의 규모로 네트워크를 축소하고  $p_{\max}=24$  dBm 으로 설정한 후에 성능을 비교하였다. 제안 방안의 경우 성능이 기존 방안에 비해 최적해에 상당히 근접함을 확인할 수 있다.

그림 2는 최대 허용 전송 파워에 따른 시스템 총 데이터 전송률을 보여주는 결과이다. Rx의 수가 3개에서 5개로 늘어날수록 multi-user 다이버시티 효과로 인해 모든 방안에서 시스템 총 데이터 전송률이 향상됨을 볼 수 있다. 제안 방안은 시스템 총 데이터 전송률뿐만 아니라 전력 획득량까지 함께 고려하기 때문에  $p_{\max}=30$  dBm 일 때 시스템 총 데이터 전송률만을 최대화하는 기존 방안보다는 성능 측면에서 최대 5% 이내의 저하를 보이지만, 그 차이는 상당히 작음을 알 수 있다.

그림 3은 최대 허용 파워에 따른 시스템 총 전력 획득량을 보여주는 결과이다. 그림 2와 비슷하게 그림

표 1. 작은 규모의 네트워크에서 최적해와의 성능 비교  
Table 1. Performance comparison with the optimal solution in small-scale networks

	Optimal solution	Proposed scheme	Conventional scheme
Utility	28.90	28.69	28.04
Sum rate (bits/s/Hz)	26.37	26.23	26.77
Harvested energy (dBm)	2.53	2.46	1.27

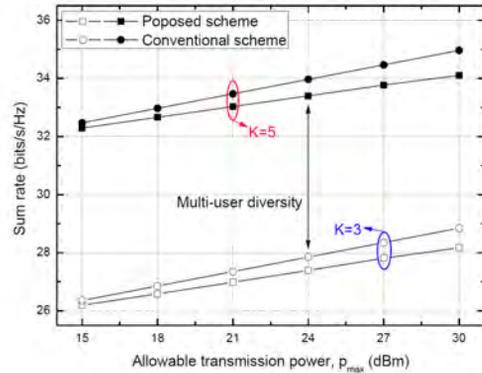


그림 2. 최대 허용 파워 대비 시스템 총 데이터 전송률.  
Fig. 2. Sum rate vs. allowable transmission power.

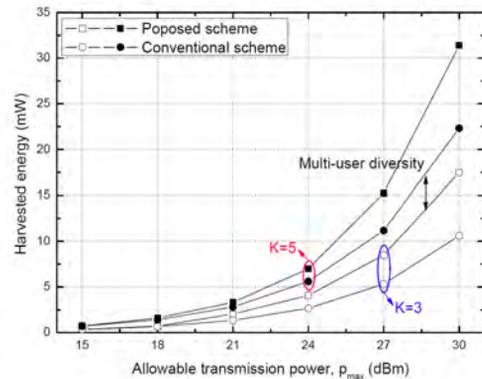


그림 3. 최대 허용 파워 대비 시스템 총 전력 획득량.  
Fig. 3. Harvested energy vs. allowable transmission power.

3에서도 Rx의 수가 3개에서 5개로 늘어날수록 전력을 획득할 수 있는 Rx의 수가 늘어나게 되므로 모든 방안에서 시스템 총 전력 획득량이 향상됨을 볼 수 있다. 또한, 제안 방안의 경우 시스템 총 데이터 전송률뿐만 아니라 전력 획득량도 균형적으로 증가시켜,  $p_{\max}=30$  dBm 일 때 기존 방안에 비해 전력 획득량을 50% 이상 향상시킴을 볼 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 수신기가 송신기로부터 전달되는 신호를 이용해 정보 수신뿐만 아니라 전력 획득이 가능한 차세대 무선 통신 시스템에서 시스템의 총 데이터 전송률과 전력 획득량을 동시에 최대화하기 위한 자원 관리 기법을 제안하였다. 제안 기법에서는 최적화 문제에 기반하여 시스템의 데이터 전송률과 전력 획득

득량을 균형적으로 최적화할 수 있도록 하는 서브 채널 및 파워 할당 해를 수학적으로 찾고, 그 값이 수렴할 때까지 반복적으로 자원을 할당한다. 시뮬레이션을 통하여 제안 기법은 기존 방안에 비해 시스템의 데이터 전송률 측면에서 5% 이내의 미미한 성능 저하를 보이지만 전력 획득량을 50% 이상 향상시킴으로써 시스템의 전력 효율성을 크게 개선시킴을 확인하였다.

## References

- [1] 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, Jul. 2013.
- [2] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 1612-1616, Jul. 2008.
- [3] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets tesla: wireless information and power transfer," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 2363-2367, Jun. 2010.
- [4] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov. 2013.
- [5] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus, and A. Yener, "Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.(JSAC)*, vol. 29, no. 8, pp. 1732-1743, Sept. 2011.
- [6] J. Park and B. Clerckx, "Joint wireless information and energy transfer in a two-user MIMO interference channel," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 4210-4221, Aug. 2013.
- [7] J. Park and B. Clerckx, "Joint wireless information and energy transfer in a K-user MIMO interference channel," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 10, pp. 5781-5796, Oct. 2014.
- [8] K. Lee, D. H. Cho, and B. C. Chung, "Resource allocation method for improving energy efficiency and receiver fairness in wireless networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 5, pp. 826-832, May 2015.
- [9] S. Lee, H. Yoo, and D. Kim, "Residual energy-aware duty-cycle scheduling scheme in energy harvesting wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 38B, no. 6, pp. 446-453, Nov. 2014.
- [10] Z. Jin, D.-Y. Kim, and J. Cho, "An analysis of energy efficient cluster ratio for hierarchical wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 39B, no. 10, pp. 691-699, Jun. 2013.
- [11] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, Jul. 2013.
- [12] I. Krikidis, "Simultaneous information and energy transfer in largescale networks with/without relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 3, pp. 900-912, Mar. 2014.
- [13] S. Lee, R. Zhang, and K. Huang, "Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio network," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 10, pp. 4788-4799, Sept. 2013.
- [14] D. T. Hoang, D. Niyato, P. Wang, and D. I. Kim, "Opportunistic channel access and RF energy harvesting in cognitive radio networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 11, pp. 2039-2052, Nov. 2014.
- [15] V. Chandrasekhar and J. Andrews, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sept. 2008.
- [16] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [17] C. Mikeka and H. Arai, "Design of a cellular energy-harvesting radio," in *Proc. 2009 Eur. Wirel. Tech. Conf.*, pp. 73-75, Sept. 2009.
- [18] H.-S. Chen and W. Gao, *MAC and PHY proposal for 802.11af*, Tech. Rep., Feb. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/10/11-10-0258-00-00af-mac-and-phy-proposal>

for-802-11af.pdf.

- [19] IEEE P802.11 Wireless LANs, *TGn channel models*, IEEE 802.1103/940r4, Tech. Rep., May 2004.

**이 기 승 (Kisong Lee)**



2007년 8월 : 한국정보통신대학교 (ICU) 전자공학과 졸업  
2009년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사  
2013년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사  
2013년 9월~2015년 2월 : ETRI

융합기술연구소 연구원

2015년 3월~현재 : 국립군산대학교 정보통신공학과 교수  
<관심분야> 이동통신, 무선전력전송, 차세대 융합통신

**조 동 호 (Dong-Ho Cho)**



1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업  
1981년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사  
1985년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사  
1985년 3월~1987년 2월 : KIST 통신공학연구실 선임연구원  
1987년 3월~1998년 1월 : 경희대학교 전자계산공학과 교수  
1998년 2월~현재 : KAIST 전기 및 전자공학과 교수  
<관심분야> 이동통신, 무선전력전송, 생명정보학

**김 민 호 (Minhoe Kim)**



2012년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 졸업  
2014년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 석사  
2014년 3월~현재 : KAIST 전기 및 전자 공학과 박사과정

<관심분야> 이동통신, 그린 커뮤니케이션, 다중 안테나