

# 무선 네트워크의 전력 효율성과 수신기 공평성 향상을 위한 자원 할당 방안

이 기 송\*, 조 동 호°, 정 병 창\*

## Resource Allocation Method for Improving Energy Efficiency and Receiver Fairness in Wireless Networks

Kisong Lee\*, Dong-Ho Cho°, Byung Chang Chung\*

### 요 약

무선 네트워크에서 서비스 공급자 및 고객을 동시에 만족시키기 위해서는 전력 효율성과 수신기 공평성 보장이 중요하다. 본 논문에서는, 최적화 기법에 기반하여 무선 네트워크의 전력 효율성과 수신기 공평성을 동시에 향상시키는 자원 할당 방안을 제안한다. 제안 방안에서는 채널 상황, 사용되는 전력량, 수신기 별 데이터 전송률을 동시에 고려하여 전력 효율성과 수신기 공평성을 높이는 방향으로 반복적으로 서브채널 및 파워를 할당한다. 시뮬레이션을 통하여 전력 효율성과 수신기 공평성 관점에서 제안하는 기법의 효율성 및 우수성을 증명한다.

**Key Words** : Energy Efficiency, Receiver Fairness, Wireless Network, Resource Allocation

### ABSTRACT

In wireless networks, it is important to guarantee the energy efficiency and receiver fairness for satisfying service provider and customer at the same time. In this paper, we propose a resource allocation algorithm which improves energy efficiency as well as receiver fairness based on optimization techniques. In the proposed algorithm, subchannel and power are allocated to receivers iteratively in the consideration of channel state information, amount of dissipated power, and receiver rate, in order to improve energy efficiency and receiver fairness. Through simulation, we show the effectiveness and superiority of the proposed algorithm in terms of energy efficiency and receiver fairness.

### 1. 서 론

국제적으로 환경 보전에 대한 관심이 높아짐에 따라, 전력 효율성 향상은 차세대 통신 시스템의 주요

연구 주제 중 하나가 되었다<sup>[1]</sup>. 이를 위해, FP7의 EARTH 프로젝트에서는 현재 사용하는 LTE 시스템의 에너지 소모를 50% 이상 줄이는 것을 목표로 셀 설치 (cell deployment) 방안, 네트워크 구조 (network

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구원진흥센터의 방송통신 산업기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [ B0101-15-1309 , 안테나 노드 그룹핑 기반 무간섭 적응빔 접속기술 개발 ]

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

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

\* Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), bcchung@comis.kaist.ac.kr  
논문번호 : KICS2014-12-485, Received December 12, 2014; Revised March 19, 2015; Accepted April 13, 2015.

architecture) 방안, 협력 통신 방안 등을 연구하고 있다<sup>2)</sup>. 또한 GreenTouch 컨소시엄에서도 효율적인 전력 사용을 위한 대규모 안테나 시스템 (large-scale antenna systems), 전송 기술 (green transmission technologies) 등을 연구 중이다<sup>3)</sup>.

논문 연구를 보면 다방면에서 전력 효율성을 향상시키기 위한 방안들이 제안되었다<sup>4-6)</sup>. [4]에서는 클러스터링 기반 센서 네트워크에서 에너지 효율성을 최대로 가지는 클러스터 비율을 분석하였고, [5]에서는 Wi-Fi Direct 환경에서 데이터 트래픽 패턴에 따른 전력 관리 기법의 성능과 에너지 효율성을 분석하였다. [6]에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드의 에너지 소모를 최소화하는 모바일 싱크노드의 이동 경로 설정 방법을 제안하였다. 또한 자원 할당 측면에서, 전력 효율성 향상을 위한 방안들이 여러 차례 제안된 것을 볼 수 있다<sup>7-9)</sup>. [7]에서는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)의 상향링크와 하향링크 환경에서 전력 효율성을 향상시키는 저복잡도 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. [8,9]에서는 OFDMA의 하향링크 환경에서 non-convex 최적화 기법을 활용해 최적의 전력 효율성을 얻는 자원 할당 알고리즘을 제안했다. 기존 연구 모두 OFDMA 환경에서 전력 효율성을 향상시켰으나, 자원 할당 과정에서 수신기 간의 공평성을 고려하지는 않았다. 즉, [7-9]에서 제안된 알고리즘은 전력 효율성을 우수하게 낼 수 있는 수신기들에게 집중적으로 자원이 할당 된다.

본 논문에서는, 송신기의 효율적인 전력 사용 및 수신기의 공평한 서비스 보장을 위한 자원 할당 방안을 제안한다. 제안한 방안은 채널 상황, 사용되는 전력량, 수신기 별 데이터 전송률 등을 고려하여 반복적으로 서브채널 및 파워 할당 값을 찾는다. 기본적으로는 전력 효율성을 향상시키기 위하여 채널 상황이 좋은 수신기에게 서브채널이 할당된다. 동시에 수신기 공평성을 보장해 주기 위해 이전 time slot까지의 평균 수신기 별 데이터 전송률을 고려하여 이 값이 작을수록 우선적으로 채널을 할당한다. 서브채널 별로 사용할 수신기가 정해진 후, 송신기는 각 서브채널 별로 파워를 할당한다. 파워 할당에서도 역시, 서브채널 별로 정해진 수신기의 평균 수신기 별 데이터 전송률이 낮을수록 또한 채널 상황이 좋을수록 많은 양의 파워가 할당된다. 이러한 원리를 토대로 목적 함수가 최적의 값에 수렴할 때까지 반복적으로 서브채널과 파워를 할당한다. 이는 멀티미디어 사용자 환경으로 변화하고 있다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 N개의 서브채널로 구성된 OFDMA 기반의 multi-receiver 시스템에서 수신기의 서비스 공평성(receiver fairness) 보장과 전력 사용 효율성(energy efficiency)을 동시에 고려하고자 한다. 송신기(Transmitter, Tx)은 한 개의 전방향성 안테나(omni-directional antenna)를 이용하고, 각각의 수신기(Receiver, Rx) 역시 한 개의 안테나를 이용한다고 가정한다.

그림 1은 수신기의 전력 사용 효율성과 서비스 공평성을 동시에 고려하는 다중 수신기 무선 네트워크를 보여 준다. 기본적으로 전력 효율성만을 고려했을 때는 채널 상황이 좋은 거리가 가까운 수신기에게 높은 서비스율을 지원하지만, 제안하는 시스템에서는 먼 거리에 위치한 수신기라도 비교적 동등한 서비스율 보장을 목적으로 한다.

각 수신기에서는 서브채널의 채널품질정보(channel quality information, CQI)를 정확하게 획득할 수 있으며, 이 정보를 이용하여 송신기는 수신기의 서비스 지원을 위한 서브채널 및 파워를 할당한다. 각 서브채널은 한 수신기에 의해서만 사용되며, 수신기의 움직임은 느려 채널의 CQI는 패킷 전송 시간동안 변하지 않는다고 가정한다<sup>10)</sup>. 본 논문에서 사용된 기호의 의미는 다음과 같다.

- N, K 는 각각 전체 서브채널의 수, 전체 수신기의 수.

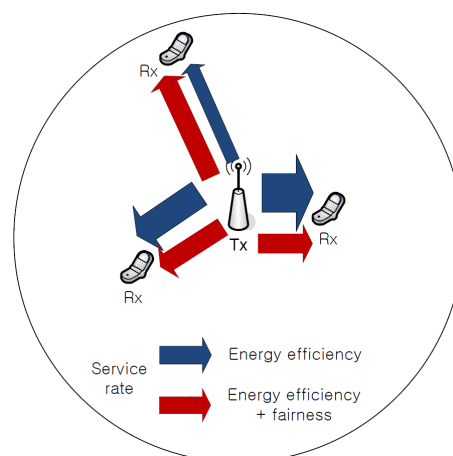


그림 1. 수신기 공평성과 전력 효율성을 고려한 다중 수신기 무선 네트워크.  
Fig. 1. Multi-receiver wireless network in consideration of energy efficiency and receiver fairness.

- $s_{k,n}$  는 수신기 k에게 서브채널 n이 할당 되었는지를 나타내는 변수로서 수신기 k에게 서브채널 n이 할당된 경우에는  $s_{k,n} = 1$ 로 표시하며, 그렇지 않은 경우에는  $s_{k,n} = 0$ 으로 표시.
- $p_n$  는 서브채널 n에 할당 하는 파워.
- $\vec{s}, \vec{p}$  는 각각  $s_{k,n}$  와  $p_n$  의 집합.
- $|h_{k,n}|^2, \sigma^2$  는 각각 서브채널 이득, AWGN (Additive White Gaussian Noise) 파워.
- $P_C, P_{\max}$  는 각각 송신기의 circuit에서 일정하게 소모되는 전력, 송신기의 전체 전송 파워.

위의 표기법을 이용하여 수신기 k가 서브채널 n을 할당 받아 송신기로부터 서비스를 받는 경우의 데이터 전송률은  $r_{k,n} = \log_2\left(1 + \frac{p_n |h_{k,n}|^2}{\sigma^2}\right)$ 으로 나타낼 수 있다. 또한, 한 수신기가 여러 개의 서브채널을 할당 받을 수 있으므로 수신기의 데이터 전송률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_k = \sum_{n=1}^N s_{k,n} r_{k,n} = \sum_{n=1}^N s_{k,n} \log_2\left(1 + \frac{p_n |h_{k,n}|^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

수식 (1)에서 수신기 k의 데이터 전송률은 수신기 k가 받은 서브채널의 데이터 전송률의 합으로 표시된다.

위의 수식을 이용하여 시스템의 전력 사용 효율성과 수신기의 서비스 공평성을 동시에 최적화하는 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\vec{s}, \vec{p}} & \frac{\sum_{k=1}^K \log_2(1 + R_k)}{P_C + \sum_{n=1}^N p_n} \\ \text{subject to} & \text{ C1: } \sum_{k=1}^K s_{k,n} \leq 1, \text{ for } \forall n \\ & \text{C2: } s_{k,n} \in \{0,1\}, \text{ for } \forall k, n \\ & \text{C3: } \sum_{n=1}^N p_n \leq P_{\max} \\ & \text{C4: } p_n \geq 0, \text{ for } \forall n \end{aligned} \quad (2)$$

최적화 문제 (2)에서, 목적 함수의 분자에 각 수신기의 데이터 전송률에 로그 함수를 씌워 수신기의 서비스 공평성을 고려하였다. 또한, 목적 함수는 전체 소모되는 전력량과 시스템 데이터 전송률의 비로 표현되어, 간접적으로 1 Joule의 전력량 당 전송되는 데

이터 전송률을 나타내므로 전력 사용 효율성을 보여준다. 최적화 문제 (2)에서 제한 조건 C1과 C2는 각각의 서브채널은 한 명의 수신기에게만 할당될 수 있음을 보여준다. 제한 조건 C3과 C4는 각각의 서브채널에 할당되는 파워는 0보다 크거나 같으며, 모든 서브채널에 할당된 파워의 합은  $P_{\max}$ 를 초과할 수 없음을 보여준다. 하지만 최적화 문제 (2)의 목적 함수는 fractional form으로 인해, non-convex한 특성을 갖는다. 그러므로 문제를 convex하게 만들어 주기 위해 subtract form으로 변환을 시켜줘야 한다. 이를 위해 목적 함수의 분모와 분자, 목적 함수 자체를 각각 다음과 같이 치환해 준다.

$$R(\vec{s}, \vec{p}) = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + R_k) \quad (3)$$

$$P(\vec{s}, \vec{p}) = P_C + \sum_{n=1}^N p_n \quad (4)$$

$$x = \frac{R(\vec{s}, \vec{p})}{P(\vec{s}, \vec{p})} \quad (5)$$

**Theorem 1** : fractional form을 갖는 원래의 목적 함수는 변환된 subtract form,  $f(x) = R(\vec{s}, \vec{p}) - xP(\vec{s}, \vec{p})$ , 와 동일하며, 최적의 해  $x^*$ 는 다음을 만족한다.

$$\begin{aligned} \max_{\vec{s}, \vec{p}} & R(\vec{s}, \vec{p}) - x^* P(\vec{s}, \vec{p}) \\ = & R(\vec{s}^*, \vec{p}^*) - x^* P(\vec{s}^*, \vec{p}^*) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $R(\vec{s}, \vec{p}) \geq 0, P(\vec{s}, \vec{p}) > 0$ 을 만족한다. 또한, 반복적 방안을 이용해 얻은 x는 최적 해에 접근하며 수렴한다.

*Proof* : 자세한 증명 과정은 [8]를 참고

Theorem 1에 따라 목적 함수를 변환하며, 최적화 문제 (2)의 제한 조건 C2 역시 binary 값에서 다음과 같이 real 값을 갖도록,  $0 \leq s_{k,n} \leq 1, \text{ for } \forall k, n$ , 제한 조건을 완화해주면 해를 찾을 수 있다.

### III. 제안하는 자원 할당 방안

제안하는 자원 할당 방안은 서브채널 할당과 파워 할당으로 이루어져 있다. 최적의 서브채널 및 파워 할당 값을 찾기 위해서는 최적화 문제 (2)의 Lagrangian

함수를 고려하여야 한다.

$$\begin{aligned} \Lambda(\vec{s}, \vec{p}, \vec{\lambda}, \mu) = & \sum_{k=1}^K \log_2(1 + R_k) - x(P_c + \sum_{n=1}^N p_n) \\ & + \sum_{n=1}^N \lambda_n \left(1 - \sum_{k=1}^K s_{k,n}\right) + \mu(P_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n). \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\vec{\lambda}, \mu$  는 음수가 아닌 Lagrangian 계수이다. 먼저, 최적의 서브채널 할당을 찾기 위해서 수식 (7) 을  $\vec{s}$  에 대해서 미분 한다.

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial s_{k,n}} = \frac{\log_2(1 + p_n |h_{k,n}|^2 / \sigma^2)}{\ln 2 (R_k + 1)} - \lambda_n \quad (8)$$

여기서  $R_k$  는 수신기 k의 이전 time slot까지의 평균적인 데이터 전송률이다. 송신기는 수식 (8)를 기반으로 각각의 서브채널에 대하여 수식 (9)을 만족하는 수신기에게 서브채널을 할당한다.

$$s_{k,n} = \begin{cases} 1 & \text{for } k^* = \arg \max_k \frac{\partial \Lambda}{\partial s_{k,n}}, \\ 0 & \text{for otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

서브채널 할당의 의미는 다음과 같다. 수식 (8)의 분자에서 보듯이, 서브채널 n에 대하여 높은 데이터 전송률을 보이는 수신기에게 서브채널이 우선적으로 할당이 된다. 또한, 수식 (8)의 분모에서 보듯이, 수신기 k의 이전 time slot까지 평균 데이터 전송률이 낮을수록 서브채널이 할당될 확률이 높아진다. 이를 통해 수신기 공평성을 보장할 수 있다.

다음으로, 송신기는 서브채널이 할당된 수신기 집합  $\vec{s}^*$ 에 대하여 서브채널 별로 파워 할당을 수행한다. 최적의 파워 할당량은 수식 (7)을  $\vec{p}$ 에 대해서 미분을 하여 찾은 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial p_n} = \frac{|h_{k^*,n}|^2 / \sigma^2}{(\ln 2)^2 (1 + p_n |h_{k^*,n}|^2 / \sigma^2) (R_{k^*} + 1)} - (x + \mu) \quad (10)$$

최적의 파워 할당은 수식 (10)으로부터 최종적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_n = \left( \frac{1}{(\ln 2)^2 (R_{k^*} + 1) (x + \mu)} - \frac{\sigma^2}{|h_{k^*,n}|^2} \right)^+ \quad (11)$$

수식 (11)에서  $[x]^+ = \max(0, x)$  이다. 파워 할당의 의미는 다음과 같다. 서브채널의 SNR (Signal-to-Noise Ratio)값이 높을수록 많은 양의 파워가 할당된다. 또한, 선택된 수신기  $k^*$ 의  $R_{k^*}$ 가 낮을수록 수신기 공평성을 맞추주기 위해 많은 양의 파워가 할당이 된다. 이를 통해 수신기  $k^*$ 의 평균 데이터 전송률은 높아질 수 있다.

할당된 파워  $\vec{p}$ 를 기준으로, Lagrangian 계수는 다음과 같은 gradient 알고리즘을 통해 업데이트 된다.

$$\mu(i) = \left[ \mu(i-1) - a \left( P_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n \right) \right]. \quad (12)$$

여기서 i는 iteration 횟수 이다. 또한, 최적화 문제 (2)에서 real 값으로 완화된 제한 조건 C2는 수식 (9)에서 다시 binary 값으로 변환되었으므로, Lagrangian 계수  $\vec{\lambda}$ 는 업데이트 되지 않아도 된다. 제안하는 방안의 동작은 알고리즘 1에 정리되어 있다. 먼저,  $\vec{s}, \vec{p}, \vec{\lambda}, \mu, x$  값을 초기화 한 후,  $\vec{s}, \vec{p}$ 가 수렴할 때까지 반복적으로 제안한 최적화 기법에 기반하여 그 값을 찾아준다. 그 후 수렴한 값  $\vec{s}, \vec{p}$ 를 이용하여 목적함수 x를 업데이트 해준 후 최종적으로 x가 최적의 값으로 수렴할 때까지 반복적으로 알고리즘을 수행한다.

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

- Initialization
  - 01: Initialize  $\vec{s}, \vec{p}, \vec{\lambda}, \mu$ , and  $x$
- Resource allocation
  - 02: repeat
  - 03:     repeat
  - 04:         Find  $\vec{s}$  according to (9)
  - 05:         Find  $\vec{p}$  according to (11)
  - 06:         Update  $\mu$  according to (12)
  - 07:     until  $\vec{s}$  and  $\vec{p}$  converge
  - 08:     Update  $x = \frac{R(\vec{s}, \vec{p})}{P(\vec{s}, \vec{p})}$
  - 09: until  $x$  converges

## IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 성능 평가를 위해 실내 통신 환경을 가정하였다. 32개의 서브채널을 발생시켰으며, 각각의 서브채널은 오직 한명의 수신기에 의해 사용된다고 가정하였다. Tx와의 2m에서 10m 사이의 거리에 10

명의 수신기를 임의로 발생시켰다. 송신기의 전체 전송 파워는 6 dBm부터 27 dBm까지 3 dBm씩 변화시켰으며, 송신기의 circuit에서 일정하게 소모되는 전력은 30 dBm으로 하였다<sup>[11]</sup>. 중심 주파수는 차세대 Wi-Fi system에서 사용될 470 MHz로 정했으며, 대역폭은 10 MHz이다<sup>[12]</sup>. Pathloss 모델은 TGn 모델을 사용했으며<sup>[13]</sup>, 무선 채널은 Rician 페이딩에 기반한 주파수 플랫 채널을 가정하였다. 노이즈는 1의 분산 값을 갖는다. 제안 방안의 성능 평가를 위해 5 time slot 동안의 얻은 결과를 통해 전력 사용 효율성과 수신기의 서비스 공평성을 평가하였다. 여기서 서비스 공평성은 다음과 같은 Jain's fairness index

$$(\eta = \frac{(\sum_{k=1}^K R_k)^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K R_k^2})$$

를 활용하였다<sup>[14]</sup>. 시뮬레이션을 통해 다음에 정의된 3가지 방안들에 대하여 성능을 비교하였다.

- PRA (Proposed Resource Allocation): 본 논문에서 제안한 자원 할당 방안이다.
  - EERA (Energy Efficient Resource Allocation) : 송신기는 수신기의 서비스 공평성을 고려하지 않고 전력 효율성을 최대화하는 방향으로 서브채널과 파워를 할당한다.
  - RMRA (Rate Maximized Resource Allocation) : 송신기는 시스템의 총 데이터 전송률을 최대화 할 수 있도록 수신기에게 서브채널을 할당하고, 각 서브채널 별로 최적의 파워를 할당한다.
- 그림 2는 최대 허용 파워에 따른 전력 효율성을 보여주는 결과이다. RMRA 기법의 경우 시스템 총 데

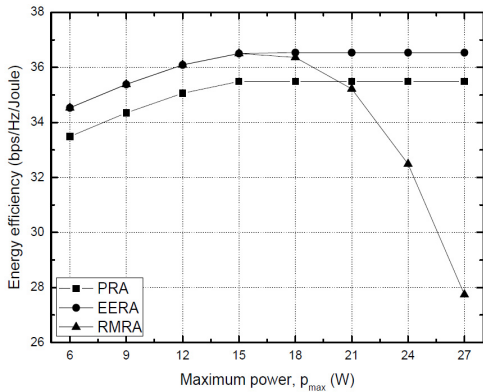


그림 2. 전력 효율성 vs. 최대 허용 파워.  
Fig. 2. Energy efficiency vs. maximum power.

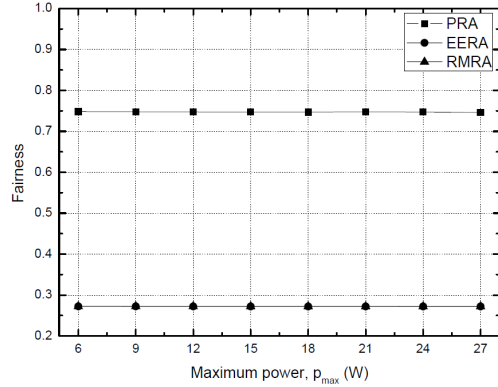


그림 3. 공평성 vs. 최대 허용 파워.  
Fig. 3. Fairness vs. maximum power.

이터 전송률을 최대화 할 수 있도록 수신기에 서브채널을 할당하고 항상 최대 허용 파워를 전부 사용하기 때문에 최대 허용 파워가 늘어날수록 전력 효율성이 현저히 떨어진다. 특히, 최대 허용 파워가 21 dBm보다 큰 경우에는 PRA보다도 전력 효율성이 낮다. PRA와 EERA를 비교해보면, EERA는 전력 효율성만을 최대화하는데 반해, PRA는 수신기 공평성과 전력 효율성을 함께 고려하기 때문에 전력 효율성 측면에서 EERA에 비해 전 구간에서 5% 이내의 손해를 본다.

그림 3은 최대 허용 파워에 따른 수신기 간의 공평성을 보여주는 결과이다. EERA와 RMRA의 경우 각각 전력 효율성과 시스템 총 데이터 전송률을 최대화하기 위하여 채널 특성이 우수한 수신기를 집중적으로 서비스하기 때문에 전체 최대 허용 파워 범위에서 수신기 공평성이 현저히 저하되는 것을 볼 수 있다. 하지만 제안하는 PRA는 수신기 공평성을 보장해주므로 최대 허용 파워가 늘어나더라도 비교적 우수한 성능을 보인다. 특히, PRA는 기존 방안인 EERA와 RMRA와 비교했을 때 수신기 공평성을 전 구간에서 0.5이상 항상 시킨다.

## V. 결론

미래 무선통신시스템에서 서비스 공급자 및 수신기의 요구사항을 동시에 만족시키기 위하여, 본 논문에서는 무선 네트워크의 전력 효율성과 수신기의 공평성을 동시에 향상시키는 자원 할당 방안을 제안하였다. 제안 방안에서는 채널 상황, 사용되는 전력량, 수신기 별 데이터 전송률을 동시에 고려하여, non-convex 최적화를 기반으로 서브채널 및 파워를

반복적으로 할당한다. 시뮬레이션을 통하여 제안 방안은 전력 효율성만을 고려한 기존 방안 대비 5% 이내의 전력 효율성 감소를 보이지만 수신기의 공평성은 0.5 이상으로 크게 향상시켜 모든 수신기를 공평하게 서비스 할 수 있음을 확인하였다.

### References

[1] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, "Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, Fourth Quarter 2011.

[2] EU FP7 EARTH Project, <https://www.ict-eart.h.eu>

[3] GreenTouch, <http://www.greentouch.org>

[4] Z. Jin, D.-Y. Kim, and J. Cho, "An analysis of energy efficient cluster ratio for hierarchical wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 38B, no. 6, pp. 446-453, Jun. 2013.

[5] Y. Seo and Y.-B. Ko, "Dynamic power management for energy efficient Wi-Fi direct," *J. KICS*, vol. 38B, no. 8, pp. 663-671, Aug. 2013.

[6] S. Yang, S. Lee, H. Rho, and W. Son, "Mobile sink based energy efficient path setup method for wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 39C, no. 11, pp. 1068-1077, Nov. 2014.

[7] C. Xiong, G. Y. Li, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, "Energy-efficient resource allocation in OFDMA networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 12, pp. 3767-3778, Dec. 2012.

[8] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 9, pp. 3292-3304, Sept. 2012.

[9] D. W. K. Ng, E. S. Lo and R. Schober, "Energy-efficient resource allocation for secure OFDMA systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 6, pp. 2572-2585, Jul. 2012.

[10] V. Chandrasekhar and J. Andrews, "Femtocell

networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sept. 2008.

[11] J. Espino and J. Markendahl, "Analysis of macro femtocell interference and implications for spectrum allocation," *IEEE 20th Int. Symp. Pers., Indoor and Mob. Radio Commun.*, pp. 2208-2212, Sept. 2009.

[12] 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>.

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

[14] R. Jain, D.-M. Chiu, and W. Hawe, *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*, Digital Equipment Corp., Tech. Rep., 1984.

### 이 기 송 (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

정 병 창 (Byung Chang Chung)



2011년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업

2013년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사

2013년 3월~현재 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정  
<관심분야> 무선통신, 게임이론, 기계학습