다양한 사용자 분포 환경에서의 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크의 에너지 효율

Energy Efficiency of Decoupled RF Energy Harvesting Networks in Various User Distribution Environments

황 유 민* · 선 영 규** · 신 요 안*** · 김 동 인**** · 김 진 영*****

* 주저자 : 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정
** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정
*** 공저자 : 숭실대학교 전자정보공학부 교수
**** 공저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
***** 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

Yu Min Hwang* · Young Ghyu Sun* · Yoan Shin** · Dong In Kim*** · Jin Young Kim*

* Dept. of Wireless communications Eng., Univ. of Kwangwoon
** Dept. of Electronic Eng., Univ. of Soongsil
*** Dept. of Information and Communication Eng., Univ. of Sungkyunkwan
† Corresponding author : Jin Young Kim, jinyoung@kw.ac.kr

Vol.17 No.4(2018)
August, 2018
pp.159~167

ISSN 1738-0774(Print)
ISSN 2384-1729(On-line)
https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.4.159

Received 27 June 2018
Revised 31 July 2018
Accepted 24 August 2018

ⓒ 2018. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 기반의 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크에서 에너지 효율을 최적화하는 알고리즘을 제안하고 사용자들의 다양한 지리적 분포 시나리오를 가정하여 에너지 효율의 변화의 트랜드를 분석 및 실험하였다. 무선 데이터 전송 및 무선 에너지 충전이 동시에 이루어지는 무선 에너지 하베스팅 네트워크에서는 에너지 효율 지표는 네트워크 성능을 판단하는 주요한 지표로서 이를 향상시키기 위해서 다양한 요소가 어떻게 영향을 줄 수 있는지 조사할 필요가 있다. 본 논문에서의 모의실험 결과에서 효과적으로 에너지 효율 내지 무선 전력전송 효율을 증대시키기 위해서 두 송신기 hybrid-access point (H-AP)와 power beacon (PB)을 기준으로 사용자들의 분포 형태가 중요한 요소라는 점을 확인할 수 있다.

핵심어 : 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크, 에너지 효율, 자원할당 최적화, 사용자 분포, 라그랑지 이중 문제

ABSTRACT

In this paper, we propose an algorithm to optimize energy efficiency in a multi-user decoupled RF energy harvesting network and experiment on the trend of energy efficiency change assuming users' various geographical distribution scenarios. In the RF energy harvesting network where both wireless data transmission and RF energy harvesting are simultaneously performed, the energy efficiency is a key indicator of network performance, and it is necessary to investigate how various factors can affect the energy efficiency. In order to increase energy efficiency effectively, we can confirm that users' distributions are important factors in the RF energy harvesting network from the simulation results.

Key words : Decoupled Radio Frequency-Energy Harvesting Network, Energy Efficiency, Convex Optimization, User Distribution, Lagrange Dual Problem

Ⅰ. 서 론

무선 주파수 (RF) 에너지 전달 및 하베스팅 기술은 차세대 네트워크에 무선으로 전력을 공급하는 혁신적 기술이다. 이 신기술은 무선 장치의 여분의 에너지 충전 시간을 가지지 않아도 되므로 통신 서비스 품질 및 편의성을 향상시키는 데에 매우 유리할 수 있다 (Xiao et al., 2015; Hwang et al., 2017).

무선 에너지 하베스팅 네트워크는 무선 신호의 거리에 따른 신호 감쇄로 인해 유효한 신호 송신 범위가 좁고 거리에 따른 제약이 크다는 단점이 있다 (Xiao et al., 2015). 또한 H-AP (hybrid-access point)에 가까운 위치에 있는 사용자는 높은 에너지 하베스팅 효율을 갖고 적은 파워로 신호를 상향링크로 송신할 수 있다. 반면 멀리 있는 사용자는 에너지 하베스팅 효율이 낮고 상향링크 송신 또한 높은 에너지가 요구되기 때문에 'doubly near-far problem' 문제가 야기된다 (Bi et al., 2015; Krikidis et al., 2014; Ju and Zhang, 2014; Zhou et al., 2012). 본 논문에서는 이러한 네트워크 자원 분배의 불공평 문제를 완화하기 위해서 네트워크에 별도의 파워비콘(PB; power beacon)을 설치하여 H-AP와 동시 운영되는 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크 (DRF-EHN; decoupled radio frequency-energy harvesting network)에 대해서 집중하고자 한다. 파워비콘은 사용자들에게 높은 에너지 하베스팅 효율을 제공해주기 위해 정보가 없는 높은 전력신호만을 송출하는 에너지 송신기이다. 한편, 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크에서 파워비콘과 H-AP를 동시에 운영할 때 사용자들의 지리적 분포가 에너지 하베스팅 속도 및 데이터 전송률에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 다양한 사용자들의 분포 시나리오를 가정해서 에너지 효율을 계산하고 그 영향의 트랜드를 분석하고자 한다.

본 논문에서는 성능 측정의 기준으로 정보 처리량과 네트워크의 소비된 전력량의 비율인 에너지 효율 (EE; energy efficiency)를 정의한다. 또한 다양한 사용자들의 분포 시나리오에서 에너지 효율의 최대값을 산출하기 위해 에너지 효율 최적화 과정을 포함한다. 에너지 효율 최적화는 세 가지 파라미터, 파워비콘의 송신 파워, H-AP의 송신파워, 전송시간 분할비율에 대한 최적화 값을 얻는 시간 스케줄링 알고리즘으로 구성된다. 모의실험에서는 여섯 명의 사용자로 구성된 세 가지 사용자 분포 시나리오를 생성하여 에너지 효율을 측정 및 분석한다.

본 논문 나머지 부분은 다음과 같다. Ⅱ장에서 시스템 모델을 기술하고 성능 지표인 에너지 효율과 최적화를 위한 제약 조건들을 정의한다. Ⅲ장에서는 라그랑지 이중 문제 (Lagrange dual problem) 기반으로 에너지 효율 최적화를 진행하고, Ⅳ장에서 다양한 사용자 분포 시나리오를 가정하여 에너지 효율 실험 결과를 보여주고 그 의미를 설명한다. 마지막으로 Ⅴ장에서는 본 논문의 결론을 내고 마친다.

Ⅱ. 시스템 모델

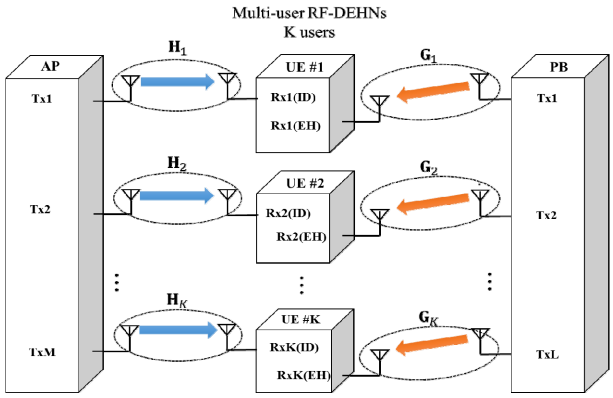
이 장에서는 앞서 정의했던 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크의 에너지 효율을 정의하고 에너지 효율 최대화를 위한 실질적인 제한조건들을 포함하는 최적화 문제를 설립한다. 먼저 <Fig. 1>과 같이 H-AP, 파워비콘, 그리고 K 사용자들이 존재한다고 가정하며 OFDMA 하향링크 네트워크에서 K 사용자에게 H-AP와 파워비콘이 신호를 전송한다 ($k \in 1, \ldots, K$). H-AP와 다르게 파워비콘의 송신 신호는 정보가 포함되지 않은 순수한 에너지 신호이며 높은 송신 파워를 가진다. 채널 모델은 단일 파워분할 (power splitting) 안테나를 가지는 사용자 모델로 single-input single-output(SISO) 시스템을 기반으로 Rayleigh fading 채널 모델로 정의한다. 사용자는 파워분할 안테나를 통해 정보 복조 및 에너지 하베스팅이 가능하다. 정보 복조 (information decoding)은 <Fig. 1>에서 ID로 표시되었으며, 에너지 하베스팅은 EH로 표시한다. k 사용자 ($1 \leq k \leq K$)의 수신 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$y_k^{ID} = h_k(1-\mu_k)(1-\theta_k)x_k^{HAP} + n_k, \tag{1}$$

$$y_k^{EH} = h_k(1-\mu_k)\theta_k x_k^{HAP} + g_k\mu_k x_k^{PB} + n_k, \tag{2}$$

h_k와 g_k는 각각 정보 복조 (information decoding; ID)와 에너지 하베스팅 (energy harvesting; EH)를 위한 일련의 독립적인 Rayleigh fading 채널이며 i.i.d. CN(0,1)을 따른다. 시간 스케줄링에 사용되는 전송시간 분할비율, μ_k는 0과 1사이로 정의되며, H-AP와 파워비콘이 같은 시간에 대한 신호전송으로 인하여 간섭을 야기하는 문제를 회피하기 위한 최적화 변수이다. θ_k는 수신 안테나의 파워분할 비율을 나타내는 변수로서 본 논문에서는 0.5 값으로 상수 값을 취한다고 가정한다.

1. 시스템 모델의 채널 용량



〈Fig. 1〉 Multi-user decoupled RF energy harvesting network

k번째 사용자에 대한 Shannon의 채널 용량 (instantaneous channel capacity) c_k는 다음과 같다.

$$c_k(p_k^{HAP}, \mu_k) = (1-\mu_k)\, W_k \log(1+\rho_k), \tag{3}$$

$\rho_k = p_k^{HAP}|h_k|/N_o W_k$는 사용자 k에 대한 평균 signal-to-noise ratio (SNR)이고 p_k^{HAP}는 H-AP의 송신파워이다.

2. 네트워크 전력 소모량

네트워크의 전체 파워 소모량 (Watt)은 다음과 같이 모델링 된다 (Tabassum and Hossain, 2015).

$$P(p_k^{HAP}, p_k^{PB}, \mu_k) = \sum_{k=1}^{K}(\zeta p_k^{HAP} + \zeta p_k^{PB}) + p_c^{HAP} + p_c^{PB} + \sum_{k=1}^{K} p_{c,k}^{UE} - \sum_{k=1}^{K} p_k^{EH}, \tag{4}$$

ζ는 파워 증폭기의 비효율을 나타내는 상수 값이며, p_c^{UE}는 사용자의 믹서나 필터, digital-to-analog 컨버터 같은 전자 장치들의 파워 소모량의 합이다. 파워비콘을 통해 하베스팅 된 에너지는 다음과 같다.

$$p_k^{EH} = \xi_k |g_k| \mu_k p_k^{PB}, \tag{5}$$

파라미터 $0 \le \xi_k \le 1$은 하베스팅 된 에너지에서 DC 파워로 변환하는데 손실되는 비효율 상수이다.

3. 네트워크 에너지 효율(EE)

네트워크 에너지 효율 최대화 문제를 수식 6과 같이 정의한다.

$$\max EE = \eta = \sum_{k=1}^{K} EE_k = \sum_{k=1}^{K} \frac{C(p_k^{HAP}, \mu_k)}{P(p_k^{HAP}, p_k^{PB}, \mu_k)}, \tag{6}$$

시스템 모델의 제약조건은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{K} p_k^{HAP} \le p_{\max}^{HAP}, p_k^{HAP} \ge 0, \ \forall k \in K, \tag{7}$$

$$\sum_{k=1}^{K} p_k^{PB} \le p_{\max}^{PB}, p_k^{PB} \ge 0, \ \forall k \in K, \tag{8}$$

$$\sum_{k=1}^{K} (\zeta p_k^{HAP} + \zeta p_k^{PB}) + p_c^{HAP} + p_c^{PB} \le p_{pg}, \ \forall k \in K, \tag{9}$$

$$c_k(p_k^{HAP}, \mu_k) \ge c_k^{QoS}, \ \forall k \in K, \tag{10}$$

$$p_k^{EH} \ge p_k^{QoP}, \ \forall k \in K, \tag{11}$$

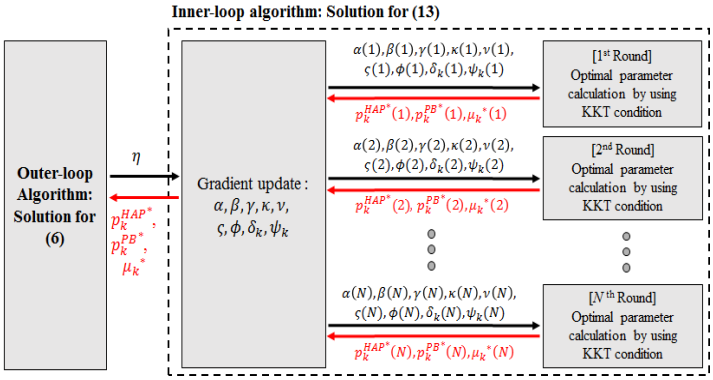
$$0 \le \mu_k \le 1 \quad \forall k \in K, \tag{12}$$

식 (6)은 에너지 효율 함수로서 채널 용량에 대한 네트워크 소모 파워의 비율을 나타낸다. 식 (6)은 non-convex 최적화 문제이며 Ⅲ 파트에서 nonlinear fractional programming (Dinkelbach, 1967)을 기반으로 convex 함수로 변환하여 최적화 과정에서의 복잡도를 감소시켜 최적화를 진행한다. 제약조건 (7)과 (8)은 HAP와 PB의 송신 파워에 대한 제약을 나타내며 $p_{\max}^{HAP}$와 $p_{\max}^{PB}$는 HAP와 파워비콘의 최대 송신파워를 의미한다. 제약조건 (9)는 네트워크의 전력 소모량이 전력망에서 공급하는 p_{pg}를 넘지 않도록 제한한다. 제약조건 (10) 및 (11)은 시스템이 만족시켜야하는 사용자의 QoS와 QoP 값을 정의하고, 각각은 최소한 c_k^{QoS}와 p_k^{QoP}를 상회하도록 제약된다. 시간 스케줄링에 사용되는 전송시간 분할비율 μ_k는 0과 1사이에서 결정될 수 있다.

Ⅲ. 에너지 효율 최대화

이 장에서는 목적 함수를 최적화 하기 위해 non-convex 목적 함수인 식 (6)을 convex 함수로 바꾸기 위한 nonlinear fractional programming (Dinkelbach, 1967)과 라그랑지 이중 문제 이론 (Boyed, 2004)에 대한 내용을 설명한다. 이러한 두 가지 최적화 기법을 통해 목적함수의 최대값을 구할 수 있는 세 가지 파라미터인 p_k^{HAP}, p_k^{PB}, 그리고 μ_k의 최적의 값을 구할 수 있다. 또한 제안된 반복 알고리즘을 통해 최적값을 빠르고 효율적으로 구할 수 있다.

1. 에너지 효율 최대화를 위한 convex 최적화



〈Fig. 2〉 energy efficiency optimization algorithm of decoupled RF energy harvesting network

식 (6)은 non-convex 함수로서 최적값을 산출할 때 복잡도가 매우 커서 효율적인 시간 스케줄링 알고리즘을 구현하기 위해 분수 형태의 식 (6)을 비 분수형태로 변환한다 (Dinkelbach, 1967). 이러한 변환을 통해 non-convex 함수는 convex 함수로 변환되므로 최적화 과정에서의 복잡도를 감소시킬 수 있다. 변환된 목적함수는 다음과 같다 (Dinkelbach, 1967).

$$\max\left\{C(p_k^{HAP},\mu_k)-\eta P(p_k^{HAP},p_k^{PB},\mu_k)\right\}, \tag{13}$$

새로운 목적함수 식 (13)에 0보다 큰 양수 값을 갖는 Lagrange multiplier와 제약조건을 결합하여 식 (13)에 더해서 라그랑지 이중 문제를 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Boyed, 2004).

$$\begin{aligned}L(p_k^{HAP},p_k^{PB},\mu_k,\alpha,\beta,\gamma,\kappa,\nu,\delta_k,\psi_k)&=\sum_{k=1}^{K}c\left(p_k^{HAP},\mu_k\right)-\eta\Big(\sum_{k=1}^{K}\left(\zeta p_k^{HAP}+\zeta p_k^{PB}\right)+p_c^{HAP}+p_c^{PB}+\sum_{k=1}^{K}p_{c,k}^{UE}-\sum_{k=1}^{K}p_k^{EH}\Big)\\&-\alpha\left(\sum_{k=1}^{K}p_k^{HAP}-p_{\max}^{HAP}\right)-\beta\left(\sum_{k=1}^{K}p_k^{PB}-p_{\max}^{PB}\right)-\kappa\left(\sum_{k=1}^{K}\mu_k-K\right)-\nu\left(\sum_{k=1}^{K}-\mu_k\right)-\gamma\left(\sum_{k=1}^{K}\left(\zeta p_k^{HAP}+\zeta p_k^{PB}\right)+p_c^{HAP}+p_c^{PB}-p_{pg}\right)\\&-\delta_k\left(c_k(p_k^{HAP},\mu_k)-c_k^{QoS}\right)-\psi_k\left(p_k^{EH}-p_k^{QoP}\right),\end{aligned} \tag{14}$$

$\alpha,\beta,\gamma,\kappa,\nu,\delta_k$, 그리고 ψ_k는 라그랑지 변수이며, 식 (14)와 Karush-Kuhn_tucker(KKT) (Boyed, 2004) 조건을 이용하면 세 파라미터 p_k^{HAP},p_k^{PB}, 그리고 μ_k의 최적값을 쉽게 도출할 수 있다. 최적화 과정의 알고리즘은 <Fig. 2>와 같이 제시한다. <Fig. 2>는 본 논문에서 제안하는 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크의 에너지 효율 최적화 알고리즘이다. 알고리즘은 2개의 반복적 알고리즘이 결합된 형태를 취하고 있으며 이는 각각 Inner-loop algorithm, Outer-loop algorithm으로 명명한다. 최초 Inner-loop algorithm에서 라그랑지 이중 문제 풀이법을 통해 최적의 p_k^{HAP},p_k^{PB}, 그리고 μ_k값을 도출하면, 이 값들을 Outer-loop algorithm의 입력값으로 전달한다. Outer-loop algorithm에서는 nonlinear fractional programming을 기반으로 최종적으로 최적의 에너지 효율 값을 도출한다.

Ⅳ. 모의실험

이 장에서는 제안한 에너지 효율 최적화 알고리즘을 기반으로 다중사용자 환경에서 사용자들의 지리적 분포를 3가지 경우로 나누어서 에너지 효율의 변화를 실험한다. 시뮬레이션은 무선 근거리 네트워크(wireless personal area network; WPAN)에서 하나의 H-AP와 파워비콘이 각각 커버리지 10 meter, 6 meter를 갖는다고 가정한다. 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크의 액티브 사용자는 총 6명으로 구성한다. QoS 및 QoP는 각각 15Mbps 및 1200μW로 설정하며, 각각은 음성 및 2D 비디오 스트리밍 트래픽을 수용할 수 있고, 2,000mAh 배터리 기준 한 시간에 1%를 충전할 수 있는 수신강도이다. 그 외의 모의실험 파라메터는 <Table 1>에서 나타낸다.

<Fig. 3~5>는 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크에서 H-AP와 PB를 기준으로 6명의 사용자가 다양하게 분포하고 있는 시나리오를 생성한 것이다. <Fig. 3>에서는 Case 1으로서 Good Condition 영역에서 사용자가 이상적인 분포를 취하고 있으며 이는 사용자의 분포 형태만으로 에너지 효율의 증대를 가져올 수 있을 것으로 예측할 수 있다. Good Condition 영역은 H-AP와 파워비콘 사이의 영역으로 두 송신기의 신호를 가장 효과적으로 손실없이 수신할 수 있어서 정보 복조와 에너지 하베스팅을 효과적으로 수행할 수 있기 때문에 에너지 효율을 높을 것으로 예측할 수 있는 영역이다.

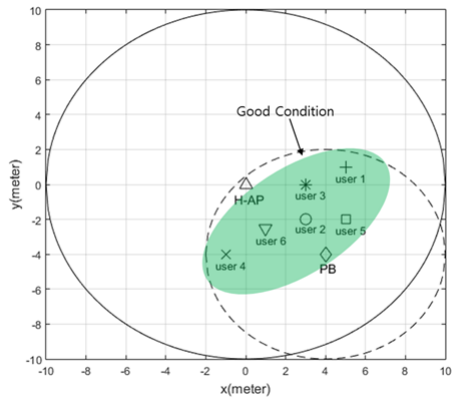
<Fig. 4>와 5는 각각 Case 2, Case 3으로서 Good Condition에 위치하는 사용자가 점차 이탈하여 H-AP와 파워비콘의 커버리지 엣지에 위치하여 에너지 효율이 감소할 것으로 예측되는 시나리오를 가정한 사용자 분포 지도이다.

<Fig. 6>은 제안한 에너지 효율 최대화 알고리즘을 사용하여 반복에 따른 에너지 효율이 최적값으로 진행하는 그래프를 나타낸다. <Fig. 6>에서는 Case 1~3별로 8번째 반복에 대해서 수렴한 에너지 효율이 앞서 예측한대로 Good Condition에 사용자가 많이 위치할수록 에너지 효율도 상승하는 결과를 보여주고 있다. 결과적으로 사용자의 분포가 에너지 효율의 증대에 큰 영향을 미치고 있기 때문에 에너지 효율을 효과적으로 상승시키기 위해서는 효율적인 에너지 효율 최대화 알고리즘의 개발도 필요하지만 사용자들의 지리적인 배치가 매우 중요하다. 사용자들이 Good Condition 영역에 위치할 수 있도록 실제 네트워크 운영에서 가이드할 수 있는 장치를 설치하는 방법을 생각해 볼 수 있다.

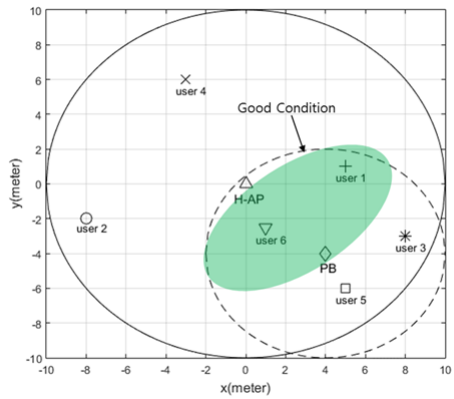
<Fig. 7>은 다양하게 파워비콘의 최대전송파워 $p_{\max}^{PB}$를 변화시켰을 때 에너지 효율의 변화를 실험하였으며, 또한 제안한 최적화 기법의 에너지 효율 성능 비교를 위해 Baseline 기법의 에너지 효율 성능을 도시하였다. 우선 $p_{\max}^{HAP}$가 1400 [mW]까지 증가 할 때, H-AP의 송신 전력은 사용자의 SNR 및 충전된 전력 모두에 영향을 미치기 때문에, 에너지 효율 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 에너지 효율 증가는 1400 [mW]가 넘으면 더 이상 증가하지 않거나 오히려 감소하는데, 이는 과도한 송신전력 사용이 에너지 효율을 감소시키는 결과를 가져왔다고 볼 수 있다. 제안 알고리즘에서 3 개의 최적화 매개 변수 중 2 개만 최적화하고 범례에 표시한 것처럼 다른 하나의 최적화 변수는 고정된 상수값으로 설정하고 최적화 하지 않는 Baseline 기법의 에너지 효율을 도시하였다. 실험 결과에서 제안한 알고리즘의 에너지 효율이 Baseline 기법과 비교하여 우월하다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 제안 알고리즘의 최적화 과정이 올바르게 동작하고 있다는 것을 의미한다.

〈Table 1〉 Simulation parameter

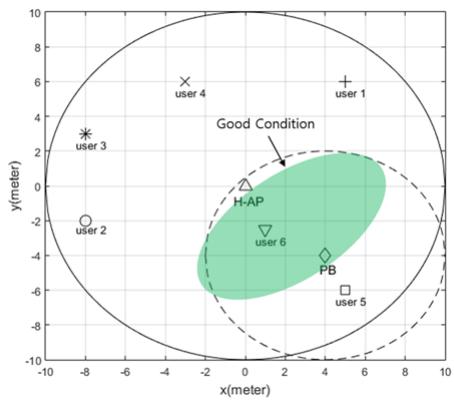
parameter	value	parameter	value
number of user	6	$p_{\max}^{HAP}$	1300mW
$p_k^{HAP}(1)$	2mW	$p_{\max}^{PB}$	12W
$p_k^{PB}(1)$	20mW	ξ_k	0.8
W_k	1MHz	c_k^{QoS}	15Mbps
p_c^{HAP}	34dBm	p_k^{QoP}	1200μW
p_c^{PB}	34dBm	f_c	38GHz
p_c^{UE}	25dBm	$N_o W_k$	-119.23dBm
p_{pg}	47dBm	N_o	-174dBm/Hz
ζ	5	ϕ	3



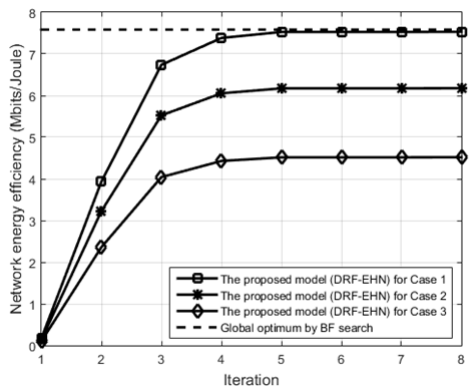
〈Fig. 3〉 The map of the decoupled RF-EHN for simulations; Case 1: ideally distributed users



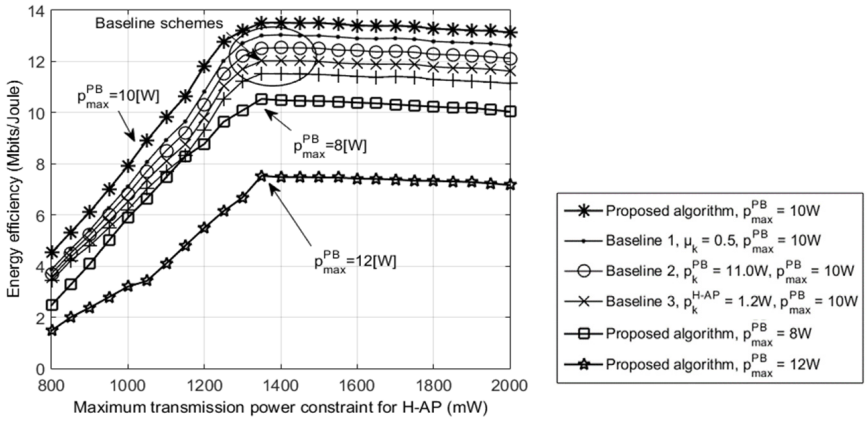
〈Fig. 4〉 The map of the decoupled RF-EHN for simulations; Case 2: normally distributed users



〈Fig. 5〉 The map of the decoupled RF-EHN for simulations; Case 3: energy-inefficiently distributed users



〈Fig. 6〉 Network energy efficiency versus iterations



〈Fig. 7〉 EE versus the maximum transmission power constraint and comparisons with baseline schemes for Case 1

Ⅴ. 결 론

본 논문은 다중 사용자를 기반으로 하는 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크에서 에너지 효율을 최적화하는 알고리즘을 제안하고 다양한 사용자들의 지리적 분포 시나리오를 가정하여 에너지 효율의 변화 트랜드를 분석 및 실험해보았다. 실험 결과로 하여금 효과적으로 에너지 효율을 증대하기 위해서 사용자들이 송신기 H-AP와 파워비콘의 핵심 영역으로 위치하는 것이 중요하다는 결론을 얻을 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014 R1A5A1011478).

REFERENCES

Bi S., Ho C. and Zhang R.(2015), “Wireless powered communication: opportunities and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp.117-125.

Boyed S. P. and Vandenberghe L.(2004), *Convex optimization*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press.

Dinkelbach W.(1967), “On nonlinear fractional programming,” *Management Science*, vol. 13, pp.492-498.

Hwang Y. M., Park J. H., Shin Y., Kim J. Y. and Kim D. I.(2017), “Transmission power and antenna allocation for energy-efficient RF energy harvesting networks with massive MIMO,” *Energies*, vol. 10, no. 6, pp.1-18.

Ju H. and Zhang R.(2014), “Throughput maximization in wireless powered communication networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp.418-428.

Krikidis I., Timotheou S., Nikolaou S., Zheng G., Ng D. W. K. and Schober R.(2014), “Simultaneous

wireless information and power transfer in modern communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp.104-110.

Tabassum H. and Hossain E.(2015), "On the deployment of energy sources in wireless-powered cellular Networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 9, pp.3391-3404.

Xiao L., Wang P., Niyato D., Kim D. I. and Han Z.(2015), "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp.757-789.

Zhou X., Zhang R. and Ho C. K.(2012), "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, U.S.A., pp.3982-3987.