

비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크를 위한 최적 시간 스케줄링 알고리즘

정준희*, 황유민*, 김진영*

Optimal Time Scheduling Algorithm for Decoupled RF Energy Harvesting Networks

Jun Hee Jung*, Yu Min Hwang*, and Jin Young Kim* *Lifelong Member*

요 약

기존 무선에너지 하베스팅시스템에서 유저는 하나의 Hybrid-AP (H-AP)로부터 에너지와 정보를 동시에 받았다. 하지만 무선에너지 하베스팅은 거리가 멀수록 감쇄가 심하기 때문에 H-AP에서 거리가 먼 유저들은 낮은 하베스팅 효율 가진다 (이중 근거리/원거리 문제). 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문은 Power beacon (PB)을 통해 유저에게 별도의 파워를 공급하는 비결합 무선 에너지 하베스팅 네트워크를 시스템 모델로 사용하였다. 이 논문의 주된 목적은 다양한 제약 조건과 Quality of service (QoS), 그리고 Quality of harvested power (QoP)를 만족하면서 목적 함수인 Energy efficiency (EE)를 최대화 하는 것이다. 제안된 시스템은 라그랑지안 쌍대 분해법 이론을 기반으로 EE 최대화를 위한 최적의 시간 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘을 통해 프레임 분해 요소, H-AP의 송신파워, 그리고 PB의 송신파워의 최적 값과 EE의 최대값을 구할 수 있다. 모의 실험 결과는 제안된 알고리즘으로 파라미터가 최적 값으로 빠르게 수렴하고 제안된 모델의 성능이 기존의 시스템 모델보다 우수하다는 것을 증명한다.

Key Words : RF Energy harvesting, Doubly near-far problem, Decoupled RF energy harvesting, Convex Optimization, Lagrange dual problem, Gradient method.

ABSTRACT

Conventional RF energy harvesting systems can harvest energy and decode information from same source as an Hybrid-AP (H-AP). However, harvesting efficiency is seriously dependent on distance between users and H-AP. Therefore, in this paper, we proposed a transmission model for RF harvesting consisting of information and power source separately called Decoupled RF Energy harvesting networks. Main purpose of this paper is to maximize energy efficiency under various constraints of transmit power from H-AP and power beacon (PB), minimum quality of service and quality of harvested power of each users. To measure proposed model's performance, we proposed optimal time scheduling algorithms for energy efficiency (EE) maximization using Lagrangian dual decomposition theory that locally maximizes the EE by obtaining suboptimal values of three arguments : transmit power of H-AP, transmit power of PB, frame splitting factor. Experiment results show that the proposed energy-efficient algorithms converge within a few iterations with its optimality and greatly improve the EE compared to that of baseline schemes.

I. 서 론

에너지 하베스팅 기술은 여러 자원 (태양, 지열, 압력)으로부터 지속적인 에너지 획득을 가능하게 하는 기술이다. 이것은 자가 운용 및 배터리 교체 없는 지속적인 동작을 가능하게 한다. 또한 에너지 하베스팅 기술은 화석 에너지 사용의

감소, 배터리 충전할 필요가 없어짐에 따른 이동성 증가, 그리고 사람 신체나 사람의 손이 닿기 힘든 곳에서 무선 장치의 설치 가능과 같은 여러 가지 이점이 있다 [1].

에너지 하베스팅 기술 중 RF 에너지 하베스팅 기술은 RF 신호를 이용하여 장거리 전송이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 주변의 RF 신호나 혹은 직접 수신 받고 있는 RF 신호

* 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A5A1011478).

*광운대학교 유비쿼터스 통신 연구실 (junheez@kw.ac.kr, yumin@kw.ac.kr, and jinyoung@kw.ac.kr)

접수일자 : 2016년 06월 15일, 수정완료일자 : 2016년 06월 27일, 최종게재확정일자 : 2016년 06월 29일

로부터 하비스팅이 가능하기 때문에 다른 에너지 하비스팅 기술보다 장거리 및 지속성에 큰 이점이 있다 [2]. 또한 무선 에너지 하비스팅 네트워크 (RF energy harvesting networks, RF-EHN)는 별도의 설비 추가 없이 기존에 존재하는 통신국 (Base station, BS)을 업그레이드해서 구현이 가능하다. 하지만 무선 에너지 하비스팅은 무선 신호의 거리에 따른 신호 감쇠로 인해 유효한 파워 송신 범위가 좁고, 거리에 따른 제약이 크다는 단점이 있다. 또한 H-AP에 가까운 위치에 있는 유저는 높은 에너지 하비스팅 능력을 갖고 적은 파워로 신호를 송신하고 멀리 있는 유저는 에너지 하비스팅 효율이 낮은 반면에 높은 에너지로 신호를 송신해야 한다는 ‘이중 근거리/장거리’ 문제가 발생한다. 이로 인해 네트워크에서 자원 분배의 불공평성 문제가 심화된다. 비결합 RF-EHN는 네트워크에 별도의 Power beacon (PB)를 추가함으로써 큰 추가 설비 비용 없이 구현이 가능하다. 이를 통해 파워 송신 범위를 증가시켰고 송신 범위 증가로 인해 이중 근거리/장거리 문제에 따른 불공평한 문제를 어느 정도 완화 시켰다 [3].

하지만 비결합 RF-EHN에서 또한 강한 간섭이 발생한다는 단점이 있다. 간섭의 발생 이유는 PB의 높은 송신 파워가 H-AP로부터 전송되는 정보 신호를 간섭할 수 있기 때문이다. 수신기가 두 신호가 동시에 받는다면 간섭으로 인해 정보 신호가 왜곡될 확률이 크다. 본 논문에서는 간섭 문제점을 해결하기 위해 프레임 전송 시간을 H-AP에 대한 시간과 PB에 대한 시간, 둘로 나누었다. 한 프레임 전송 시간을 T 라고 가정하고, 이 때 프레임 분해 요소를 μ 라고 가정한다. 한 프레임내에 PB의 송신 시간을 μT , H-AP의 송신 시간을 $(1 - \mu)T$ 다. 일반적으로 H-AP의 커버리지 범위가 PB보다 크고 PB는 H-AP의 커버리지 내에 존재하기 때문에 시간의 동기화가 H-AP에 의해 자동으로 이루어진다고 가정한다.

본 논문에서는 성능 측정의 기준으로 정보 처리량과 네트워크의 소비된 전력량의 비율인 Energy efficiency (EE)를 정의한다. EE의 단위는 bits/Joule이며 에너지 하비스팅에 대한 정의가 분모에 포함되기 때문에 EE의 최대화는 곧 정보 처리량과 하비스팅 된 에너지의 최대화를 뜻한다. 따라서 본 논문은 최적화 시나리오를 통해 세 가지 파라미터 (PB의 송신 파워, H-AP의 송신파워, 프레임 분해 요소)에 대한 최적화 값을 얻는 시간 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 모의 실험은 여덟 명의 유저로 구성된 시나리오로 Quality of Service(QoS)와 Quality of harvested power (QoP)를 만족시키면서 최대의 EE를 갖게 하는 최적의 파라미터 값을 찾는 방향으로 진행된다.

본 논문 나머지 부분은 다음과 같다. II장에서 시스템 모델을 제안하고 성능 지표인 EE와 제약 조건들을 정의한다. III장에서는 최적화를 통해 라그랑주 쌍대 문제에 대한 식을 유도하고 시간 스케줄링 알고리즘을 서술한다, IV장에서는 실험 결과를 보여주고 그 의미를 설명한다. 마지막으로 IV장

에서는 본 논문의 결론을 내고 마친다.

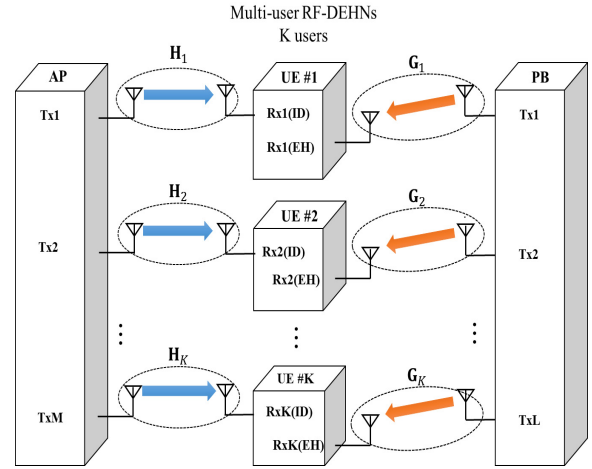


그림 1. 다중 유저 비결합 RF-EHN 모델.

II. 시스템 모델

이 장에서는 앞서 정의했던 비결합 RF-EHN를 자세히 살펴보고 주어진 시나리오에서 EE 최적화 문제를 풀기 위해 네트워크가 어떻게 동작하는지 살펴본다.

먼저 H-AP, PB, 그리고 K 유저들이 존재한다고 가정한다. OFDMA 다운링크 네트워크에서 K 유저에게 H-AP와 PB가 신호를 전송한다 ($k \in 1, \dots, K$). PB와 달리 H-AP의 송신 신호는 변조되지 않는 높은 송신 파워를 가지고 있다.

1. 다중 사용자 기반 채널 모델

채널 모델은 시간 스위칭 안테나를 가지는 유저 기반으로 하는 레일리 페이딩 채널 모델로 정의된다. k 유저 ($1 \leq k \leq K$)가 갖는 수신 신호는 다음과 같이 정의된다.

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

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

여기서 h_k 와 g_k 는 각각 정보 복호화 (Information decoding, ID)와 에너지 하비스팅 (Energy harvesting, EH)을 위한 일련의 독립적인 레일리 페이딩 채널이고 i.i.d. $CN(0,1)$ 을 따른다. 상가성 잡음 n_k 는 평균 0, 공분산 n_o W_k (n_o 는 잡음 파워 스펙트럼 밀도, W_k 는 주파수 대역)를 갖는 복소 가우시안 벡터이다.

2. 시스템 모델의 채널 용량

user k에 대한 채널 용량 c_k 은 다음과 같다.

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

여기서 $\rho_k = p_k^{HAP}|h_k|/N_o W_k$ 는 유저 k에 대한 평균 SNR이고 p_k^{HAP} 는 H-AP의 송신파워이다.

3. 네트워크 전력 소모량

네트워크의 전체 파워 소모량 (Watt)은 다음과 같다.

$$P(p_k^{HAP}, p_k^{PB}, \mu_k) = \zeta \sum_{k=1}^K (p_k^{HAP} + p_k^{PB}) - \sum_{k=1}^K p_k^{EH}, \quad (4)$$

여기서 ζ 는 파워 증폭기의 비효율을 나타내는 상수 값으로 만약 ζ 값이 5라면, RF 신호 1Watt를 송신하는데 5Watt다. PB로부터 하비스팅 된 RF 에너지는 다음과 같다.

$$p_k^{EH} = \xi_k |g_k| \mu_k p_k^{PB}, \quad (5)$$

여기서 $0 \leq \xi_k \leq 1$ 은 하비스팅 된 에너지에서 DC 파워로 변환하는데 손실되는 비효율 상수이다.

4. 네트워크 에너지 효율(EE)

따라서 성능 분석을 위한 목적함수 EE는 다음과 같이 정의된다.

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

시스템 모델의 제약조건은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^K p_k^{HAP} \leq p_{\max}^{HAP}, p_k^{HAP} \geq 0, \forall k \in K, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K p_k^{PB} \leq p_{\max}^{PB}, p_k^{PB} \geq 0, \forall k \in K, \quad (8)$$

$$0 \leq \mu_k \leq 1 \quad \forall k \in K, \quad (9)$$

식 (6)은 목적함수로서 채널 용량에 대한 네트워크 소모 파워의 비율을 나타낸다. 식 (6)은 비볼록 함수의 최적화 문제이며 III 파트에서 볼록 함수로 바뀌어서 진행한다. 제약조건 (7)과 (8)은 H-AP와 PB의 송신 파워에 대한 제약을 나타낸다. p_{\max}^{HAP} 와 p_{\max}^{PB} 는 H-AP와 PB의 최대 송신파워를 의미하며 송신파워는 0 이상의 양수값을 가진다. 제약조건 (9)에서 시간 스케줄링에 사용되는 시간 프레임 분해 요소, μ_k 는 0과 1사이로 정의된다.

III. 에너지 효율 최적화

이 장에서는 목적 함수를 최적화 하기 위해 비볼록 목적 함수인 식 (6)을 볼록 함수로 바꾸기 위한 nonlinear fractional programming과 라그랑지안 쌍대 분해법 이론에 대한 내용을 설명한다. 이러한 두 가지 최적화 기법을 통해 목적함수의 최대 값을 구할 수 있는 세 가지 파라미터인 p_k^{HAP} , p_k^{PB} , 그리고 μ_k 의 최적의 값을 구할 수 있다. 또한 제안된 반복 알고리즘을 통해 최적값을 빠르고 효율적으로 구할 수 있다.

식 (6)은 비볼록 함수이기 때문에 풀기가 어렵고 풀 수 있다고 해도 복잡도가 너무 크다. 따라서 효율적인 시간 스케줄링 알고리즘을 구현하기 위해 분수 형태의 식 (6)을 뺄셈 형태로 변환한다 [9]. 이러한 변환을 통해 비볼록 함수는 볼록 함수로 변환되므로 좀 더 쉽게 최적화를 할 수 있다. 변환된 목적함수는 다음과 같다.

$$\max \{C(p_k^{HAP}, \mu_k) - \eta P(p_k^{HAP}, p_k^{PB}, \mu_k)\}, \quad (10)$$

제약조건은 이전과 같다.

새로운 목적함수 식 (10)에 0보다 큰 양수 값을 갖는 라그랑주 승수와 제약조건을 곱하고 식 (10)에 더해서 라그랑주 쌍대 문제 (라그랑지안)를 만들고, 쌍대성에 의해 목적함수의 최대화는 라그랑지안의 최소값을 구하는 방향으로 바뀌게 된다. 라그랑주 쌍대 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L(p_k^{HAP}, p_k^{PB}, \mu_k, \alpha, \beta, \kappa, \nu) = & \sum_{k=1}^K c(p_k^{HAP}, \mu_k) \\ & - \eta \left(\sum_{k=1}^K (\zeta p_k^{HAP} + \zeta p_k^{PB}) + p_c^{HAP} + p_c^{PB} + \sum_{k=1}^K p_{c,k}^{UE} \right. \\ & - \sum_{k=1}^K p_k^{EH} \left. - \alpha \left(\sum_{k=1}^K p_k^{HAP} - p_{\max}^{HAP} \right) - \gamma \left(\sum_{k=1}^K \mu_k - K \right) \right. \\ & \left. - \beta \left(\sum_{k=1}^K p_k^{PB} - p_{\max}^{PB} \right) - \kappa \left(\sum_{k=1}^K - \mu_k \right), \quad (17) \end{aligned}$$

여기서 α, β, γ 그리고 κ 는 라그랑주 승수이다.

위 식과 Karush-Kuhn_tucker(KKT) 조건을 이용하면 세 파라미터 p_k^{HAP} , p_k^{PB} , 그리고 μ_k 의 최적값을 손쉽게 구할 수 있다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 시간 스케줄링 알고리즘을 나타낸다. 먼저 파라미터 값들을 초기화한 후, 식 (17)과 Karush-Kuhn_tucker(KKT) 조건을 이용하여 세 파라미터 p_k^{HAP} , p_k^{PB} , 그리고 μ_k 의 값을 구한다. 세 파라미터값과 Gradient descent method를 통해 라그랑주 승수를 갱신하고 설정한 임계점에 수렴하는지를 확인한다. 라그랑주 승수가 수렴하지 않는 경우, 위 과정을 반복한 후 라그랑주 승수의

수렴 여부를 확인한다. 만약 임계점에 수렴하면 세 파라미터의 값을 이용해 EE를 구하고, 구한 값이 τ 보다 작으면 세 파라미터를 최적값으로 설정, 알고리즘을 종료한다. 그렇지 않은 경우 η 값을 갱신한 후 위 과정을 반복한다.

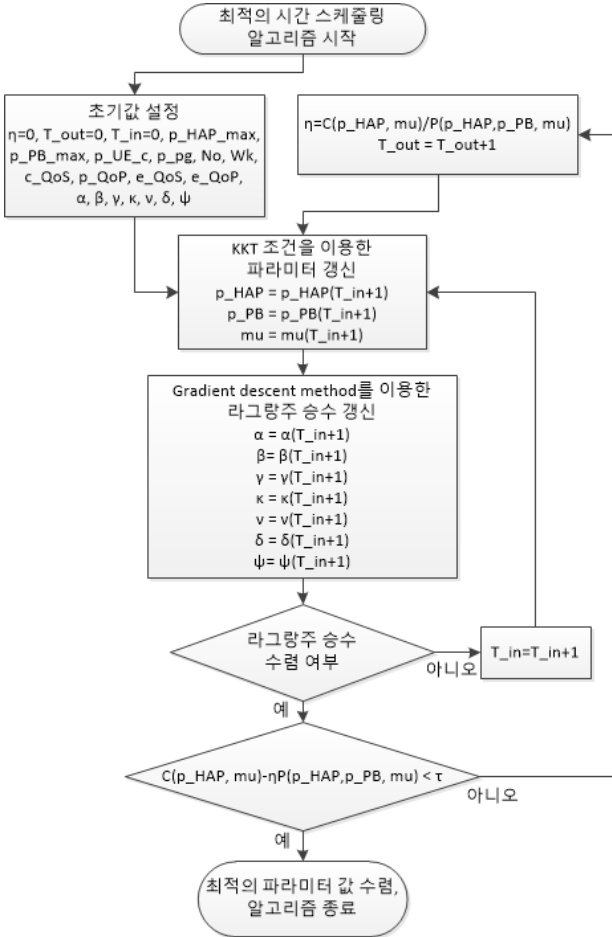


그림 2. 최적의 시간 스케줄링 알고리즘

IV. 모의 실험

이 챕터는 본 논문에서 제안한 모델과 기존 모델을 비교하기 위해 다양한 실험 결과를 보여준다. 실험에 사용된 파라미터 값은 표 2와 같다. 유저 1~8과 H-AP와의 거리는 6m, 12.7m, 10.05m, 3.2m, 8.6m, 9.5m, 5.2m, 3m이고 PB와의 거리는 10m, 6.74m, 8.31m, 12.1m, 3.16m, 5.1m, 4.36m, 13.68m이다.

그림 3은 반복 횟수(iteration)에 대한 프레임 분해 요소를 나타낸다. 제안된 시간 스케줄링 알고리즘을 통해 반복 4회 만에 결과 값에 빠르게 수렴한다. PB에 가까운 유저일수록 에너지 하베스팅 효율이 높기 때문에 적은 프레임 분해 요소를 가지는 것을 확인할 수 있다. 유저 3은 다른 유저에 비해 PB로부터 다소 가깝기 때문에 낮은 프레임 분해 요소를 가진다.

표 1. 모의실험 파라미터

| 파라미터 | 값 | 파라미터 | 값 |
|-----------------|--------|----------------|------------|
| 유저 수 | 8명 | p_{max}^{PB} | 12W |
| $p_k^{HAP}(1)$ | 2mW | ξ_k | 0.8 |
| $p_k^{PB}(1)$ | 20mW | c_k^{QoS} | 15Mbps |
| W_k | 1MHz | p_k^{QoS} | 1200μW |
| ζ | 5 | f_c | 38GHz |
| ϕ | 3 | $N_o W_k$ | -119.23dBm |
| p_{max}^{HAP} | 1300mW | N_o | -174dBm/Hz |

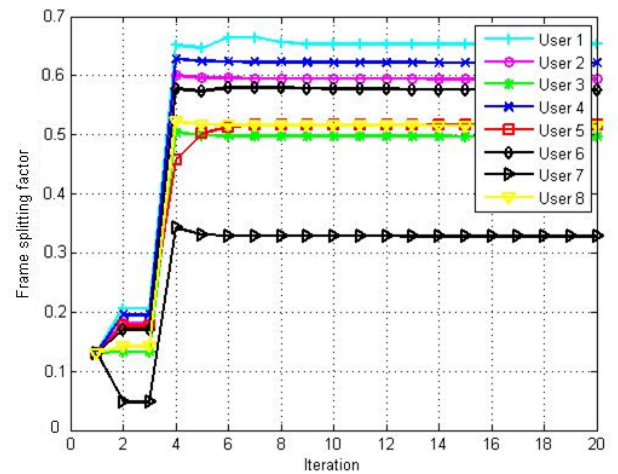


그림 3. 반복 횟수에 대한 프레임 분해 요소

그림 4는 반복 횟수에 대한 H-AP와 PB의 송신 파워를 나타낸다. 제안된 시간 스케줄링 알고리즘을 통해 반복 4회 만에 결과 값에 빠르게 수렴한다. 송신 파워는 거리에 따른 파워 감쇄가 심하기 때문에 H-AP나 PB로부터 거리가 먼 유저일수록 낮은 송신 파워 값을 가진다. 또한 PB가 가지는 기본 송신파워가 H-AP보다 크기 때문에 PB의 송신 파워가 H-AP의 송신 파워보다 전반적으로 큰 값을 가지게 된다.

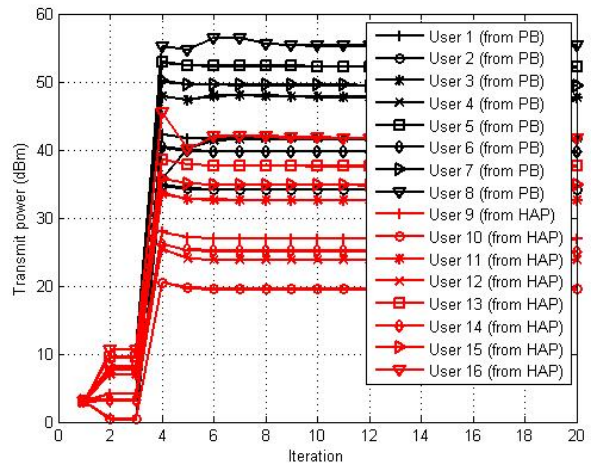


그림 4. 반복 횟수에 대한 H-AP와 PB의 송신파워

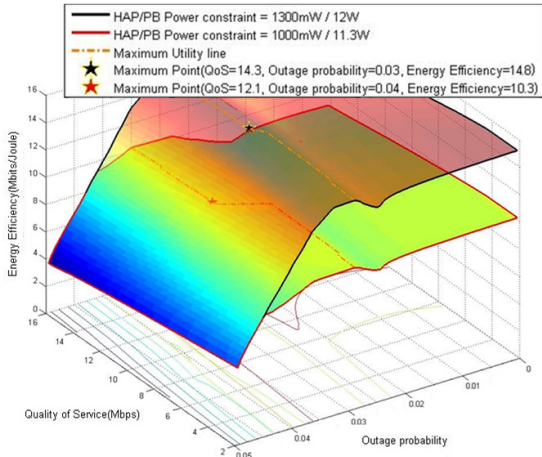


그림 5. 다양한 QoS와 outage 확률에 대한 EE

그림 5는 QoS와 outage 확률에 대한 EE를 나타낸 그림이다. H-AP와 PB의 파워 제약이 증가할수록 EE가 증가 하는데, 이는 송신 파워가 증가하면 채널용량과 하비스팅된 파워가 모두 증가하기 때문이다. 여기서 중요한 것은 제한된 송신 파워 내에서 EE를 최대화하기 위해 위치적으로 다양하게 분포되어 있는 각각의 유저들에게 최적의 파워를 할당하는 것이다. 본 실험에서는 outage 확률이 0.03, QoS가 14.3Mbps로 설정하였을 때 EE가 최대값으로 나타났다.

V. 결론

본 논문은 다중 유저를 기반으로 하는 비결합 RF-EHNs에서 EE를 최대화 하기 위한 최적화 논문이다. 유저의 QoS와 QoP를 보장하면서 EE를 최대화하기 위해서 적절한 시간 스케줄링 알고리즘을 제안했다. 모의 실험 결과는 제안된 알고리즘을 통해 적은 반복으로 최적 값으로 빠르게 수렴하게 되고 기존 시스템보다 성능이 우수하다는 것을 입증하였다.

참고 문헌

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

[2] S. Ulukus, A. Yener, E. Erkip, O. Simeone, M. Zorzi, P. Grover, and K. Huang, "Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol. 33, no. 3, pp. 360-381, Jan. 2015.

[3] K. Huang and X. Zhou, "Cutting last wires for mobile communications by microwave power transfer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 6, pp. 86-93, June 2015.

[4] S. Bi, C. Ho, and R. Zhang, "Wireless powered communication: opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53,

no. 4, pp. 117-125, Apr. 2015.

[5] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 104 - 110, Nov. 2014.

[6] H. Ju and R. Zhang, "Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks," *IEEE Trans. On Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, Jan. 2014.

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

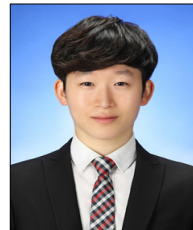
[8] H. Tabassum and E. Hossain, "On the Deployment of Energy Sources in Wireless-Powered Cellular Networks," *IEEE Trans. On Commun.*, vol. 63, no. 9, pp. 3391-3404, Sept. 2015.

[9] W. Dinkelbach, "On Nonlinear Fractional Programming," *Management Science*, vol. 13, pp. 492 - 498, Mar. 1967. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2627691>

저자

정 준 희(Jun Hee Jung)

준회원



- 2015년 2월 : 광운대학교 전자융합 공학과 졸업
- 2015년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

<관심분야> : 무선 통신, 위치추위, 빅데이터, 항재밍 기술, 무선에너지 하비스팅

황 유 민(Yu Min Hwang)

준회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학 학사졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정

<관심분야> : 무선 통신, 위치추위, 인지무선통신, 무선에너지 하비스팅

김 진 영(Jin Young Kim)

종신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자 공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자 융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지 무선통신, 이동통신