

무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크를 위한 전송시간 최적 할당 기법

황유민*, 이선의*, 신영규*,
 심이삭*, 신요안**, 김동인***,
 김진영^o

Optimal Transmission Time Allocation for RF-Powered Backscatter Cognitive Radio Networks

Yu Min Hwang*, Sun Yui Lee*,
 Young Kyue Sun*, Isaac Sim*,
 Yoan Shin**, Dong In Kim***,
 Jin Young Kim^o

요약

무선 충전, 스펙트럼 센싱, 후방산란 통신을 위해 전송 시간이 다중 분할된 무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크의 에너지 효율 최대화를 위한 전송 시간 최적 할당 알고리즘을 제안한다. 제안한 기법은 오경보 확률과 탐지 확률을 고려한다. 모의실험을 통해 에너지 효율 최적화 성능의 우수성을 확인하였다.

Key Words : RF-powered backscatter communications, cognitive radio, energy efficiency, resource allocation, Lagrange dual problem

ABSTRACT

We propose an optimal transmission time allocation

scheme to maximize the energy efficiency of radio frequency(RF)-powered backscatter (BS) cognitive radio networks (CRNs) where the transmission time is divided for RF energy harvesting, spectrum sensing, and backscatter communications. The probability of false alarm and the probability of detection are considered in constructing the proposed scheme. In computer simulations, we confirmed the performance of the proposed scheme.

I. 서론

무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크에서는 배터리 없이 무선 충전을 기반으로 통신을 수행하는 후방산란 노드를 위해서 에너지 효율적인 전송 전략의 마련이 요구된다^[1]. 특히, 이 네트워크에서는 스펙트럼 센싱을 통해 통신 주파수를 확보하기 때문에, 무선 충전, 스펙트럼 센싱, 후방산란 통신^[2]으로 분할된 전송 시간을 에너지 효율적으로 할당해야 할 필요성이 제기된다. 이후 논문에서는 무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크를 위한 에너지 효율 최대화 문제를 정의하고 이를 해결하기 위한 전송 전략을 제안한다.

II. 시스템 모델

그림 1과 같이 무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크는 hybrid-access point (H-AP), carrier emitter (CE), 1차 사용자로서 후방산란 센서노드 (primary user, PU), 2차 사용자로서 후방산란 센서노드 (secondary user, SU)로 이루어지며, 후방산란 센서노드는 CE의 신호를 반사와 동시에 2진 주파수 편이 변조하여 후방산란 통신한다. SU는 스펙트럼 센싱하여 1차 사용자의 주파수 채널이 Idle 상태로 확인된 경우, H-AP에게 후방산란 통신을 통해 정보를 전송하며 전력 분할 안테나를 탑재하여 무선 충전과 후방산란 통신을 수행할 수 있다. SU 관점에서 PU가 “Busy”인

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

• First Author : (ORCID:0000-0003-4659-8178)Energy Harvesting Communications Research Center, Sungkyunkwan University, yoomin2046@naver.com, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1456-7097)Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University, jinyoung@kw.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0001-5479-3200, 0000-0001-7279-5090, 0000-0002-9949-8544)Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University, {sunyuil22, yakrkr, dltkr34}@naver.com, 학생회원

** (ORCID:0000-0002-4722-6387)School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 종신회원

*** (ORCID:0000-0001-7711-8072)School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, dikim@skku.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201809-286-C-LU, Received September 15, 2018; Revised January 2, 2019; Accepted January 2, 2019

경우와 “Idle”인 경우에 따라 전체 전송시간을 $(1-\alpha)$ 와 α 로 분할하며, Idle인 경우에는 스펙트럼 센싱과 후방산란 통신을 위해 $A\alpha$ 와 $(1-A\alpha)$ 의 비율로 각각에 대해 2차 분할한다. 스펙트럼 센싱과 후방산란 통신을 위한 시간비율은 전체 전송시간에 대해서 $A\alpha^*$ 과 $(1-A\alpha)^*$ 로 표현된다. 본 논문에서는 불완전한 스펙트럼 센싱의 영향을 분석하기 위해 탐지확률 P_D 와 오경보 확률 P_f 파라미터를 수식에 적용한다. 또한 Busy 상태일 확률값 π_0 와 Idle 상태일 확률값 π_1 을 최적화 문제 정의에서 도입한다 ($\pi_0 + \pi_1 = 1$). H-AP에서 SU로부터 수신한 후방산란 신호의 평균 전력은 다음과 같이 표현된다¹¹.

$$P_B = P_C h_{CT} h_{TH} s^2 (\gamma_0 - \gamma_1)^2 (1/\pi)^2 \quad (1)$$

여기서 P_C 는 CE의 전송파워, s 는 태그의 산란 효율을 반영하는 스케일링 계수, γ_0 와 γ_1 는 2진 주파수 편이 변조를 위한 반사 계수, h_{CT} 와 h_{TH} 는 Rayleigh short-term fading 계수이며 각각은 CE와 SU간 채널, SU와 H-AP간 채널을 의미한다. H-AP에서의 신호 대 잡음비는 다음과 같다.

$$SNR = P_B / \sigma_B^2, \quad (2)$$

여기서 σ_B^2 는 잡음 파워 스펙트럼 밀도이다. 후방산란 전송시간 $(1-A\alpha)\alpha$ 에 대한 데이터 전송률을 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$C = Z\alpha(1-A\alpha) W \log_2(1+SNR), \quad (3)$$

여기서 $Z = (1-P_f)\pi_1 + (1-P_D)\pi_0$, W 는 후방산란 신호의 대역폭이다. 제한한 시스템 모델에서 SU는 PU가 Busy 상태일 때 CE로부터 무선 충전을 $(1-\alpha)$ 시간동안 수행한다.

$$E_H = K(1-\alpha)(\eta P_H h_{TH} + \eta P_C h_{CT}), \quad (4)$$

여기서 P_B , η , K 는 각각 H-AP의 전송파워, 무선 충전 변환 효율, $P_f \pi_1 + P_D \pi_0$ 이다. 에너지 제한조건 C_e 은 다음과 같이 설정한다.

$$C_e = \begin{cases} SNR \geq SNR_{TH} & (C1) \\ E_H \geq (1-\alpha)P_{th}^E & (C2) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 SNR_{TH} 은 후방산란 통신을 위한 최소 SNR, P_{th}^E 는 최소 달성해야 할 무선 충전량이다. 에너지 효율 최적화 문제 P1은 다음과 같이 정의한다.

$$(P1) \quad EE = \max_{\alpha, A} \frac{C(\alpha, A)}{E_H(\alpha)}, \quad (6)$$

여기서 EE 는 최적화된 에너지 효율이며, P1은 제한조건 C1와 C2를 만족하는 내에서 동작한다.

본 논문의 목표는 최적의 전송 시간 비율 α 와 A 를 도출하여 에너지 효율적인 전송을 수행하는 것이다.

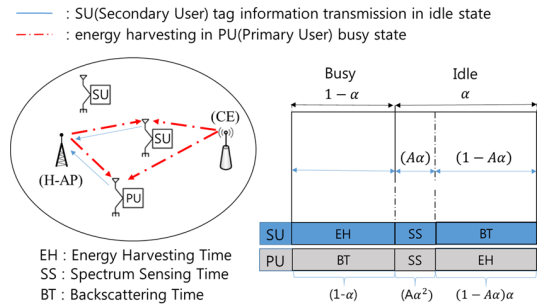


그림 1. 무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크의 전송시간 분할 구조

Fig. 1. Transmission time structure of RF-powered BS CRNs.

III. 에너지 효율 최대화

에너지 효율 함수 P1은 잘 알려진 non-convex 함수로서 global optimum을 도출하기 위해서는 brute-force 접근 등 최적화 변수 α 와 A 가 가질 수 있는 모든 범위에서 조사를 통해서만 도출이 가능하며 이는 실현되기 어려운 복잡도를 갖는다. 따라서 nonlinear fractional programming^[3]을 이용하여 convex 함수로 변환하고 이를 P2로 정의한다.

$$(P2) \quad \max_{\alpha, A} C(\alpha, A) - EE^* E_H(\alpha), \quad (7)$$

제한조건은 P1과 동일하며, convex 함수의 최적값 도출은 Lagrangian dual decomposition^[4]을 통해서도 도출한다. 문제 P2에 대한 Lagrange 함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L(\alpha, A, \mu, \nu) = C - EE^* E_H + \mu(SNR - SNR_{TH}) + \nu(E_H - (1-\alpha)P_{th}^E), \quad (8)$$

여기서 μ 와 ν 는 Lagrange multiplier이며, 다음 수식 (9), (10)을 통해 반복적으로 갱신되어 최적화 될 수 있다 (ω_1 및 ω_2 는 iteration step).

$$\mu_{m+1} = [\mu_m - \omega_1 (SNR - SNR_{TH})]^+, \quad (9)$$

$$\nu_{m+1} = [\nu_m - \omega_2 (E_H - (1 - \alpha)P_{th}^E)]^+, \quad (10)$$

최적 시간 분할 비율 α^* 과 A^* 은 식 (8)과 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)^[3] 조건식 (11), (12)를 연립 방정식으로 풀면 구할 수 있다.

$$\partial L / \partial \alpha = 0, \quad (11)$$

$$\partial L / \partial A = 0. \quad (12)$$

제안한 최적화 알고리즘은 표 1에서 기술한다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

제안한 최적화 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 표 2의 모의실험 파라미터를 기반으로 표 1의 알고리즘을 컴퓨터 실험하였다.

그림 2는 제안한 알고리즘의 반복횟수 m 을 3

표 1. 무선 충전 후방산란 인지무선 네트워크를 위한 전송 시간 최적화 알고리즘
Table 1. Algorithm for transmission time optimization for RF-powered BS CRNs.

Input	$P_D, P_f, \pi_0, \pi_1, s, P_C, \gamma_0, \gamma_1, h_{CT}, h_{TH}, \sigma_B^2, P_H, SNR_{TH}, P_{th}^E, \omega_1, \omega_2$, tolerance factor ϕ
1. Initialize	$\alpha_m, A_m, \mu_m, \nu_m, m = 1, m_{max}$
3. Compute	α^* and A^* by jointly solving (11-12)
4. If	$C(\alpha, A) - EE^* E_H(\alpha) < \phi$ or $m > m_{max}$
5. Return	$\alpha^* = \alpha_m, A^* = A_m$ with optimal EE
6. else	Update α_m, A_m from (9-10) and go to line 3 with $m = m + 1$

표 2. 모의실험 파라미터
Table 2. Parameters for computer simulations.

P_D, P_f	0.9, 0.01	SNR_{TH}, P_C	10, 0.04[W]
π_0, π_1	0.7, 0.3	P_{th}^E	0.016[W]
γ_0, γ_1	1, -1	P_H	0.025[mW]
s, η	0.3, 0.5	σ_B^2	-174[dBm/Hz]

회~15회로 설정하여 최적화 파라미터 $\{\alpha, A\}$ 에 대해서 에너지 효율을 도기한 것이다. 반복횟수가 증가함에 따라 에너지 효율이 상승하지만 반복횟수 10회에서 에너지효율 향상이 포화되는 것을 알 수 있다.

그림 3은 busy 상태 확률 π_0 을 다양하게 설정했을 때 기존 시스템^[1]과 전역적 최적해와의 비교를 위한 에너지효율 성능을 도기한 것이다. "Period"는 PU가 자신의 채널을 차지하는 시간을 의미하며, π_0 는 그 시간에 채널을 실질적으로 사용하는 확률을 의미한다. Period가 약 0.3이상인 경우에 제안한 알고리즘이 기존의 시스템과 에너지 효율면에서 우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 이는 0.8 이상인 경우에는 전역적 최적해에 준하는 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

제안한 알고리즘을 무선 충전 후방산란 인지무선

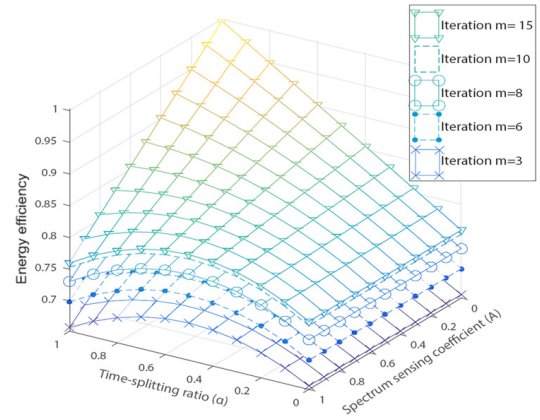


그림 2. 다양한 반복횟수 m 및 파라미터 $\{\alpha, A\}$ 에 대한 에너지 효율
Fig. 2. Energy efficiency versus different iteration number m and parameters $\{\alpha, A\}$.

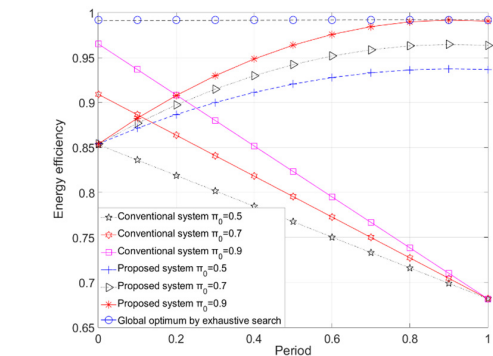


그림 3. 다양한 busy 상태 확률에 대한 에너지 효율
Fig. 3. Energy efficiency versus different probabilities of busy state of PU.

네트워크에 적용하여 에너지 효율을 개선하면 가스 유출 탐지, 대기 센싱, 침입 감지, 스마트 홈, 무인 로봇 등등 사물인터넷을 위한 더욱 폭넓은 응용분야로의 확장 응용이 가능하다.

References

- [1] S. H. Kim and D. I. Kim, "Hybrid backscatter communication for wireless-powered heterogeneous networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 10, pp. 6557-6570, Oct. 2017.
- [2] T. L. N. Nguyen, et al., "Energy detector design for ambient backscatter communications," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2232-2240, Dec. 2017.
- [3] W. Dinkelbach, "On nonlinear fractional programming," *Manag. Sci.*, vol. 13, no. 7, pp. 492498, Mar. 1967.
- [4] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*, U. K.: Cambridge Univ. Press, 2004.