

에너지 하베스팅 간섭 채널을 위한 에너지 효율적인 자원 관리 방안

이 기 송*, 최 현 호^o

Energy-Efficient Resource Management for Energy Harvesting Interference Channel

Kisong Lee*, Hyun-Ho Choi^o

요 약

본 논문에서는 에너지 하베스팅이 가능한 간섭 채널 환경에서 시간 전환 기반의 SWIPT 기술을 사용할 때 에너지 효율성을 최대화하기 위한 자원 관리 방안을 제안한다. 시물레이션을 통하여 최적의 전송 전력과 시간 전환 비율을 사용하는 제안 방안이 기존 방안에 비해 에너지 효율성을 크게 개선함을 확인하였다.

Key Words : Energy efficiency, energy harvesting, interference channel, resource management, SWIPT, optimization

ABSTRACT

In this paper, we propose a resource management scheme for maximizing energy efficiency when time switching-based simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technique is used in energy harvesting-enabled interference channel environments. Simulation results show that the proposed algorithm improves energy efficiency from the effective resource management, compared to the conventional schemes.

I. 서 론

최근 RF 신호를 이용하여 무선 노드에 정보뿐만 아니라 전력까지 동시에 전송하기 위한 SWIPT 기술에 대한 관심이 커지고 있다^[1-5]. 데이터 수신 중 일정 시간 동안 정보를 수신하고, 나머지 시간동안 전력을 수신하는 시간 전환(Time switching)은 대표적인 SWIPT 기법이다^[1,3]. 노드의 전력량이 중요한 SWIPT 시스템에서는 단일 전력량 당 전송되는 데이터량으로 정의되는 에너지 효율성은 중요한 성능 지표이다^[4-5]. 기존 연구는 간섭이 없는 인지 라디오 환경과 셀룰러 환경에서 에너지 효율성을 최대화하기 위한 전송 전력 제어를 연구하였다^[4,5]. 본 논문에서는 다수의 D2D pair가 같은 주파수 대역에서 동시에 전송을 수행하여 간섭을 미치는 시간 전환 기반의 SWIPT 시스템을 고려한다. 최적화와 nonlinear fractional programming을 이용하여 에너지 효율성을 최대화하기 위한 전송 전력과 시간 전환 비율을 도출하고자 한다. 다양한 시물레이션 환경에서 기존 방안과의 비교를 통해 제안 방안의 성능 이득을 검증한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 송신기와 RF 신호로부터 전력 획득이 가능한 수신기로 이루어진 K개의 D2D pair가 존재하는 SWIPT 시스템을 고려한다. 수신기는 시간 전환 기법을 이용하여 정보와 전력을 동시에 수신한다^[1-3]. 예를 들어 수신 시간의 α_i 만큼의 비율은 정보 수신에 사용하고, 나머지 $1-\alpha_i$ 만큼의 비율은 전력 수신에 사용한다. 송신기 i 와 수신기 j 사이의 채널의 이득은 $|h_{i,j}|^2$ 로 나타내며, 각각은 독립적인 Rician random variable이라 가정한다^[3]. 또한, 수신기에는 다음과 같은 백색 잡음 $n \sim CN(0, \sigma^2)$ 이 존재한다^[1-2]. D2D pair는 같은 주파수 대역을 공유하여 서로 간섭을 미치므로 시스템의 데이터 전송률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

* 이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C4070466).

• First Author : (ORCID:0000-0001-8206-4558)Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, kslee85@cbnu.ac.kr, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6785-2596)Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201906-108-A-LU, Received June 13, 2019; Revised July 14, 2019; Accepted July 15, 2019

$$R(\vec{p}, \vec{\alpha}) = \sum_{i=1}^K \alpha_i r_i = \sum_{i=1}^K \alpha_i \log_2(1 + \gamma_i) \\ = \sum_{i=1}^K \alpha_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i |h_{i,i}|^2}{\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^K p_j |h_{j,i}|^2} \right). \quad (1)$$

식 (1)에서 $\vec{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_K\}$, $\vec{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K\}$ 로 정의되며, γ_i 는 D2D pair i 의 Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio(SINR)이다. 또한, 데이터 신호뿐만 아니라 간섭 신호에서도 전력 수신기가 가능하므로, 각각의 수신기가 획득한 전력은 수식적으로 $(1 - \rho_i) \eta_i \sum_{j=1}^K p_j |h_{j,i}|^2$ 으로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 D2D 네트워크의 총 에너지 소모량은 다음과 같이 표현된다.

$$E(\vec{p}, \vec{\alpha}) = \sum_{i=1}^K \left(P_C + p_i - (1 - \alpha_i) \eta_i \sum_{j=1}^K p_j |h_{j,i}|^2 \right). \quad (2)$$

식 (2)에서 P_C 는 D2D pair i 의 일정한 회로 전력 소모량이며, η_i 는 에너지 변환 효율이다. 에너지 효율성은 시스템의 소모 전력 대비 데이터 전송률로 정의되므로, 식 (1)과 (2)를 이용하여 $EE(\vec{p}, \vec{\alpha}) = \frac{R(\vec{p}, \vec{\alpha})}{E(\vec{p}, \vec{\alpha})}$ 으로 표현할 수 있다^{4,5}.

이를 이용하여 에너지 효율성을 최대화하기 위한 최적의 전송 전력 \vec{p} 과 시간 전환 비율 $\vec{\alpha}$ 을 찾는 다음의 최적화 문제를 정의한다.

$$\max_{0 \leq \vec{p}, 0 \leq \vec{\alpha} \leq 1} EE(\vec{p}, \vec{\alpha}) \\ \text{s.t. } p_i \leq P_{\max}, \text{ for } \forall i. \quad (3)$$

식 (3)에서 각 송신기의 전송 전력은 최대 전송 전력 P_{\max} 보다 작아야 한다. Nonlinear fractional programming 기법을 적용하면 식 (3)을 다음의 subtract 형태를 갖는 동일한 문제로 변환할 수 있다^{5,6}.

$$\max_{0 \leq \vec{p}, 0 \leq \vec{\alpha} \leq 1} R(\vec{p}, \vec{\alpha}) - x E(\vec{p}, \vec{\alpha}) \\ \text{s.t. } p_i \leq P_{\max}, \text{ for } \forall i. \quad (4)$$

알고리즘 1. 제안하는 자원 관리 방안
Algorithm 1. Proposed Resource Management

```

01: Initialize  $\vec{p}, \vec{\alpha}, \vec{\mu}$ 
02: repeat
03:   Set  $x = R(\vec{p}, \vec{\alpha}) / E(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 
04:   repeat
05:     repeat
06:       repeat
07:         Find  $\vec{p}$  according to (6)
08:         Update  $\vec{\mu}$  according to (8)
09:       until  $\vec{p}$  converges
10:       Update  $t$  according to (7)
11:     until  $t$  converges
12:     Find  $\vec{\alpha}$  according to (9)
13:   until  $\vec{\alpha}$  converges
14:   Update  $R(\vec{p}, \vec{\alpha})$  and  $E(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 
15: until  $|R(\vec{p}, \vec{\alpha}) - x E(\vec{p}, \vec{\alpha})| < \epsilon$ 

```

위에 정의된 문제는 간섭으로 인해 non-convex이므로 global optimal 해를 closed-form으로 찾는 것은 불가능하다. 그러므로 우리는 최적화 기법을 이용해 suboptimal 해를 도출하고자 한다.

먼저 (4)의 Lagrangian 함수를 고려한다.

$$A(\vec{p}, \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i |h_{i,i}|^2}{\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^K p_j |h_{j,i}|^2} \right) \\ - x \sum_{i=1}^K \left(P_C + p_i - (1 - \alpha_i) \eta_i \sum_{j=1}^K p_j |h_{j,i}|^2 \right) + \sum_{i=1}^K \mu_i (P_{\max} - p_i). \quad (5)$$

식 (5)에서 $\vec{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K\} \geq 0$ 으로 Lagrangian 계수이다. 식 (5)를 p_i 에 대해 미분하고 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)조건을 이용하여 p_i 의 해를 수식 (6)과 같이 찾는다. 수식 (6)에서 $[y]^+ = \max(0, y)$ 이며, D2D pair i 가 다른 D2D pair들에게 미치는 간섭을 나타내는 t_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$t_i = \sum_{k=1, k \neq i}^K \frac{\alpha_k |h_{i,k}|^2 \gamma_k}{\sigma^2 + \sum_{l=1}^K p_l |h_{l,k}|^2}. \quad (7)$$

$$p_i = \left[\frac{\alpha_i}{\ln 2 \left\{ \lambda_i + x \left(1 - \sum_{j=1}^K (1 - \alpha_j) \eta_j |h_{i,j}|^2 \right) \right\} + t_i} - \frac{\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^K p_j |h_{j,i}|^2}{|h_{i,i}|^2} \right]^+. \quad (6)$$

또한, $\vec{t} = \{t_1, t_2, \dots, t_K\}$ 로 정의한다. 식 (6)에서 찾은 p_i 를 기반으로 gradient 알고리즘을 이용해 Lagrangian 계수를 다음과 같이 업데이트 한다.

$$\mu_i^{t+1} = [\mu_i^t - \nu_i(P_{\max} - p_i)]^+, \text{ for } \forall i. \quad (8)$$

또한, 식 (5)를 α_i 에 대해 미분하고 KKT 조건을 이용하여 α_i 를 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{if } r_i > x\eta_i \sum_{j=1}^K p_j |h_{j,i}|^2 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

도출한 p_i 와 α_i 를 이용하여 다음의 반복적 알고리즘을 통해 suboptimal \vec{p} 와 $\vec{\alpha}$ 값을 찾을 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 환경은 다음과 같다²⁻³. $K=3$, $\eta_i = 0.5$ for $\forall i$, $P_C = 30 \text{ dBm}$, $\sigma^2 = -70 \text{ dBm}$, 데이터 링크의 거리 = 10m, 간섭 링크의 거리 = 20m, path-loss exponent = 3.6, K-factor = 5 dB를 갖는 Rician small fading을 이용하여 채널을 생성하였다. 또한, 제안 방안의 우수성을 검증하기 위해 $R(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 을 최대화하는 Rate max. 방안과 항상 $p_i = P_{\max}$, $\alpha_i = 0.5$ for $\forall i$ 로 설정한 Equal 방안을 비교 방안으로 선정하였다.

그림 1은 최대 전송 전력(P_{\max})에 대한 송신기의 평균 전송 전력(p_{avg})을 보여준다. 제안 방안의 경우 P_{\max} 가 증가하더라도 23 dBm 이상의 전력을 사용하

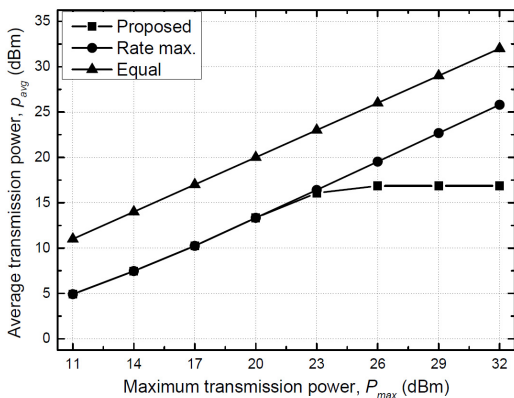


그림 1. 평균 전송 전력 vs. 최대 전송 전력
Fig. 1. Average transmission power vs. Maximum transmission power

지 않는다. 반면, Rate max. 방안과 Equal 방안의 P_{\max} 가 증가하면 사용하는 전송 전력도 커지는 것을 확인할 수 있다. Equal 방안의 경우 항상 최대 허용 전력을 모두 사용하지만, Rate max. 방안의 경우 $R(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 을 최대화하기 위해 간섭을 고려하여 최적의 전송 전력을 결정하기 때문에 Equal 방안보다는 적은 전송 전력을 사용한다.

그림 2는 최대 전송 전력(P_{\max})에 대한 에너지 효율성($EE(\vec{p}, \vec{\alpha})$)을 보여준다. Rate max. 방안의 경우 $P_{\max} > 23 \text{ dBm}$ 인 구간에서 P_{\max} 가 증가할수록 제안 방안과 비교하여 $R(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 가 증가한다. 하지만 $R(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 의 증가량보다 $E(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 의 증가량이 더 커지므로 $EE(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 는 오히려 제안 방안보다 감소한다. Equal 방안 역시 효율적인 전력 제어가 불가능하여 P_{\max} 가 증가할수록 $EE(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 가 급격하게 감소한다. 반면 제안 방안은 효율적인 자원 관리로 P_{\max} 가 증가하더라도 최적의 $EE(\vec{p}, \vec{\alpha})$ 를 유지한다.

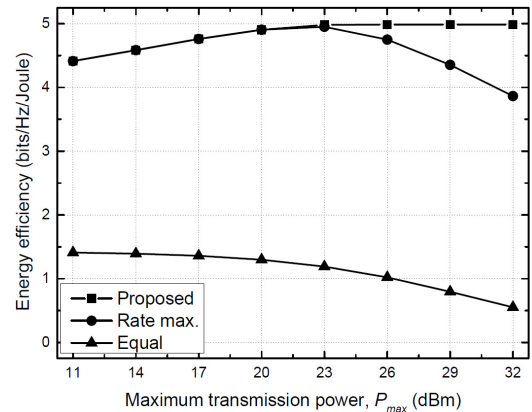


그림 2. 에너지 효율성 vs. 최대 전송 전력
Fig. 2. Energy efficiency vs. Maximum transmission power

IV. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅이 가능한 간섭 채널 환경에서 시간 전환 기반의 SWIPT 기술을 사용할 때 에너지 효율성을 최대화하기 위한 전송 전력과 시간 전환 비율을 도출 하였다. 시뮬레이션 결과는 제안 방안이 효율적으로 전송 전력과 시간을 분배하여 기존 방안에 비해 높은 에너지 효율성을 달성할 수 있음을 보여준다.

References

- [1] L. Liu, R. Zhang, and K.-C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 288-300, Jan. 2013.
- [2] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Wireless-powered relays in cooperative communications: Time-switching relaying protocols and throughput analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 5, pp. 1607-1622, May 2015.
- [3] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Second Quarter 2015.
- [4] K. Lee and W. Lee, "Energy efficient resource allocation with energy harvesting in cognitive radio networks," *J. KIICE*, vol. 20, no. 7, pp. 1255-1261, Jul. 2016.
- [5] D. W. K. Ng, E. Lo, and R. Schober, "Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, pp. 3292-3304, Sep. 2012.
- [6] W. Dinkelbach, "On nonlinear fractional programming," *Manag. Sci.*, vol. 13, no. 7, pp. 492-498, Mar. 1967.