DBpia

논문 19-44-11-20 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '19-11 Vol.44 No.11
https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.11.2127

전력 분할 기반의 SWIPT를 위한 에너지 효율성 최적화

이 기 송◆, 채 성 호°

Optimization of Energy Efficiency for SWIPT with Power Splitting

Kisong Lee◆, Sung Ho Chae°

요 약

본 논문에서는 전력 분할 기반의 SWIPT 기능을 갖춘 간섭이 존재하는 무선 네트워크의 에너지 효율성을 최대화하기 위한 nonlinear fractional programming과 최적화 기법을 이용해 전송 전력과 전력 분할 비율을 도출하였다. 시뮬레이션 결과는 제안 방안이 효율적인 전력 제어를 통해 기존 방안에 비해 향상된 에너지 효율성을 달성함을 보여준다.

Key Words : Energy efficiency, SWIPT, power splitting, co-channel interference, optimization

ABSTRACT

In this paper, we use nonlinear fractional programming and optimization technique to derive the solutions of transmission power and power slitting ratio for maximizing energy efficiency in wireless networks with co-channel interference, which is capable of simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) functionality with a power splitting. Simulation results show that the proposed algorithm achieves higher energy efficiency from the efficient power management than the conventional schemes.

Ⅰ. 서 론

최근 정보와 전력을 동시에 전송하기 위한 simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 수신한 전력을 나누어 일정 비율은 정보를 수신하고, 나머지 비율은 전력을 수신하는데 사용하는 전력 분할(Power splitting)은 대표적인 SWIPT 기법이다[1-3]. 특히, SWIPT 환경에서는 1 Joule의 전력량 당 전송되는 데이터량으로 정의되는 에너지 효율성은 중요한 성능 지표가 될 수 있다[4-5]. 기존 연구에서는 간섭이 없는 비교적 단순한 환경에서 에너지 효율성을 개선하기 위한 전송 전력 제어 기술을 제안하였다[4-5]. K개의 간섭 채널이 존재하는 SWIPT 환경에서 최소 Signal-to- Interference-plus-Noise Ratio (SINR)를 최대화하기 위한 최적의 전송 전력과 전력 분할 비율을 도출한 기존 연구가 존재하지만, 이는 본 논문에서 고려하는 성능 지표인 에너지 효율성과는 차이가 있다[6]. 본 논문에서는 서로 간섭을 미치는 다수의 송수신기가 존재하는 전력 분할 기반의 SWIPT 시스템을 고려한다. Nonlinear fractional programming과 최적화 기법을 이용하여 네트워크의 에너지 효율성을 최대화하기 위한 전송 전력과 전력 분할 비율을 도출하고자 한다. 또한, 다양한 시뮬레이션 환경에서 기존 방안과의 비교를 통해 제안 방안의 우수성을 검증한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서 송신기와 수신기 1쌍으로 이루어진 K개의 송수신기 pair가 존재하는 네트워크를 고려한다. 각각의 pair는 같은 주파수 대역을 사용하므로 서로 간섭을 미치며, 수신기는 전력 분할 기법을 이용하여 정보와 전력을 동시에 수신할 수 있는 노드이다[1-3]. 예를 들어 수신 전력 중 ρ_i 만큼의 비율은 정보 수신에 사용하고, $1-\rho_i$ 만큼의 비율은 전력 수신에 사용한다. 송신기 i와 수신기 j 사이의 채널의 이득은 $|h_{i,j}|^2$ 로 표현하며, 독립적인 Rician random variable이라 가정한다[4]. 또한, 수신기에는 다음과 같은 안테나 잡음

※ 이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B6003297).
◆ First Author : (ORCID:0000-0001-8206-4558)Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, kslee85@cbnu.ac.kr, 정회원
° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6429-1324)Kwangwoon University, Department of Electronic Engineering, sho.chae00@gmail.com, 종신회원
논문번호 : 201909-188-C-LU, Received September 4, 2019; Revised September 25, 2019; Accepted September 26, 2019

www.dbpia.co.kr

$n_A \sim CN(0\ ,\ \sigma_A^2)$과 베이스밴드 잡음 $n \sim CN(0\ ,\ \sigma^2)$이 존재한다[1-2]. 이러한 환경에서 네트워크의 데이터 전송률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

식 (1)에서 전송 전력과 전력 분할 비율은 다음의 수식 $\vec{p}=\{p_1,p_2,\cdots,p_K\}$, $\vec{\rho}=\{\rho_1,\rho_2,\cdots,\rho_K\}$로 각각 정의되며, γ_i는 송수신기 pair i의 SINR이다. 반면에 각각의 수신기는 데이터 신호뿐 만 아니라 간섭 신호에서도 전력 수신이 가능하므로, 전력 수신량은 다음의 수식 $(1-\rho_i)\eta_i\sum_{j=1}^{K}p_j|h_{j,i}|^2$ 으로 표현할 수 있다. 그러므로 네트워크의 총 에너지 소모량은 다음과 같다.

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

식 (2)에서 P_C는 송수신기 pair i의 회로에서의 전력 소모량이며, η_i는 에너지 변환 효율이다. 에너지 효율성은 전체 소모 전력 대비 전체 데이터 전송률로 정의되므로, $EE(\vec{p},\vec{\rho}) = \frac{R(\vec{p},\vec{\rho})}{E(\vec{p},\vec{\rho})}$으로 표현할 수 있다[4-5].

위의 수식을 이용하여 에너지 효율성을 최대화하기 위한 최적의 전송 전력 $\vec{p}$과 전력 분할 비율 $\vec{\rho}$을 찾는 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

식 (3)에서 $P_{\max}$는 최대 허용 전송 전력이다. Nonlinear fractional programming 기법을 적용하여 식 (3)을 다음의 동일한 subtract 형태의 문제로 변환할 수 있다[4].

$$\max_{0\le\vec{p},0\le\vec{\rho}\le 1} \quad R(\vec{p},\vec{\rho})-xE(\vec{p},\vec{\rho}) \quad s.t. \quad p_i \le P_{\max},\ \text{for}\ \forall i. \quad (4)$$

간섭이 고려되는 환경에서 최적화 문제 (4)는 non-convex이므로 global optimal 해를 closed-form으로 찾는 것은 불가능하다. 하지만 suboptimal 해는 다음의 최적화 기법을 통해 찾을 수 있다.

먼저 (4)의 Lagrangian 함수를 고려한다.

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

식 (5)에서 $\vec{\lambda}=\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_K\}\ge 0$으로 Lagrangian 계수이다. 식 (5)를 p_i에 대해 미분하면, Karush–Kuhn–Tucker(KKT)조건으로부터 p_i를 식 (6)과 같이 찾을 수 있다. 식 (6)에서 $[y]^+=\max(0,y)$이며, t_i는 송신기 i가 다른 수신기들에게 미치는 간섭을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

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

또한, $\vec{t}=\{t_1,t_2,\cdots,t_K\}$로 정의한다. 할당된 전송 전력 p_i를 이용하여 Lagrangian 계수는 다음과 같은 gradient 알고리즘을 통해 업데이트 된다.

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

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

$$\rho_i = \left[\frac{-\sigma^2(2\mu_i-p_i|h_{i,i}|^2)+\sqrt{\sigma^2p_i|h_{i,i}|^2\left(\sigma^2p_i|h_{i,i}|^2+\frac{4\mu_i(\mu_i-p_i|h_{i,i}|^2)}{\ln 2(x\eta_i(\mu_i-\sigma_A^2))}\right)}}{2\mu_i(\mu_i-p_i|h_{i,i}|^2)}\right]_0^1. \quad (9)$$

www.dbpia.co.kr

또한, 식 (5)를 ρ_i에 대해 미분하면, KKT 조건으로부터 ρ_i를 식 (9)과 같이 찾을 수 있다. 여기서 $\mu_i = \sigma_A^2 + \sum_{j=1}^{K} p_j |h_{j,i}|^2$, $[y]_0^1 = \min(\max(0,y),1)$이다. 도출한 p_i와 ρ_i에 대한 수식을 이용하여 다음의 반복적 알고리즘을 통해 suboptimal $\vec{p}$와 $\vec{\rho}$값을 찾을 수 있다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 환경은 다음과 같다[3-4]. $K=3$, $\eta_i = 0.5 \text{ for } \forall i$, $P_C = 30 dBm$, $\sigma^2 = -70 dBm$, $\sigma_A^2 = -100 dBm$. 데이터 링크의 평균 거리 = 5m, 간섭 링크의 평균 거리 = 10m, path-loss exponent = 3.6, K-factor = 6 dB를 갖는 Rician small fading을 이용하여 채널을 생성하였다[3-5]. 또한, 비교 방안으로는 $R(\vec{p},\vec{\rho})$을 최대화하는 Rate max. 방안과 항상 $p_i = P_{\max}, \rho_i = 0.5$로 설정하는 Equal 방안을 선정하였다. Rate max. 방안의 경우 식 (4)의 objective를 $R(\vec{p},\vec{\rho})$로 변경함으로써 얻을 수 있다.

그림 1은 최대 전송 전력($P_{\max}$)에 대한 데이터 전송률($R(\vec{p},\vec{\rho})$)을 보여준다. $P_{\max}$가 증가하더라도 제안 방안은 에너지 효율성 측면에서 최적인 23 dBm 이상의 전력을 사용하지 않는다. 이는 23 dBm 이상의 전송 전력을 사용 시 데이터 전송률의 증가량보다 소모 전력의 증가량이 더 커져 오히려 에너지 효율성을 낮추기 때문이다. 반면, Rate max. 방안의 경우 $P_{\max}$가 증가하더라도 $R(\vec{p},\vec{\rho})$을 최적화하는 방향으로 간섭 제어를 효율적으로 잘하여 $R(\vec{p},\vec{\rho})$이 커지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Equal 방안의 경우 항상 최대 전송 전력을 사용하며 송수신기 pair가 서로 간섭을 미치므로 $P_{\max}$가 증가하더라도 $R(\vec{p},\vec{\rho})$이 상대적으로 일정하다.

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

```
Initialize p, ρ, λ
repeat
    Set x = R(p,ρ)/E(p,ρ)
    repeat
        repeat
            repeat
                Find p according to (6)
                Update λ according to (8)
            until p converges
            Update t according to (7)
        until t converges
        Find ρ according to (9)
    until ρ converges
    Update R(p,ρ) and E(p,ρ)
until |R(p,ρ) − xE(p,ρ)| < ε
```

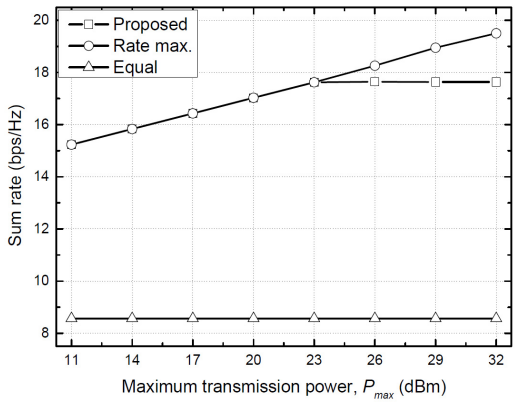

그림 1. 데이터 전송률 vs. 최대 전송 전력
Fig. 1. Sum rate vs. Maximum transmission power

그림 2는 최대 전송 전력($P_{\max}$)에 대한 에너지 효율성($EE(\vec{p},\vec{\rho})$)을 보여준다. Rate max. 방안의 경우 $P_{\max}$가 증가할수록 $R(\vec{p},\vec{\rho})$은 커지지만 그에 못지않게 소모 전력도 커져 $P_{\max} > 23$ dBm인 구간에서는 $EE(\vec{p},\vec{\rho})$가 오히려 급격히 감소한다. Equal 방안 역시 효율적인 전력 제어가 불가능하여 $P_{\max}$가 증가할수록 $EE(\vec{p},\vec{\rho})$가 감소한다. 반면 제안 방안은 $P_{\max}$가 증가하더라도 최적의 $EE(\vec{p},\vec{\rho})$를 유지함을 확인할 수 있다.

그림 3은 $P_{\max} = 32$ dBm일 때 송수신기 pair 수(K)에 대한 에너지 효율성($EE(\vec{p},\vec{\rho})$)을 보여준다. K가

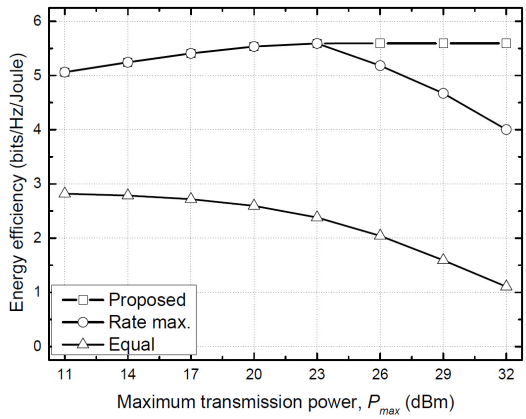

그림 2. 에너지 효율성 vs. 최대 전송 전력
Fig. 2. Energy efficiency vs. Maximum transmission power

www.dbpia.co.kr

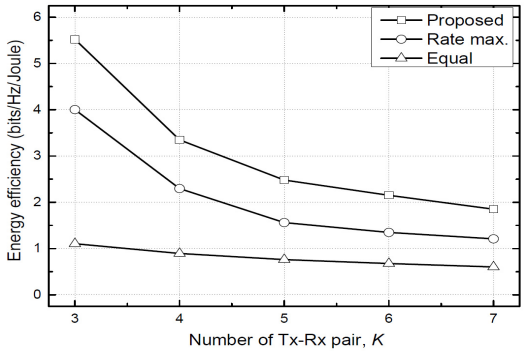

그림 3. 에너지 효율성 vs. 송수신기 pair의 수
Fig. 3. Energy efficiency vs. Number of Tx-Rx pair

증가할수록 획득하는 전력량보다 소모하는 전력량의 증가량이 더 커져 네트워크 전체의 에너지 효율성은 감소한다. 하지만 제안 방안은 Rate max.나 Equal 방안에 비해 높은 에너지 효율성을 달성함을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 전력 분할 기반의 SWIPT 기능을 갖춘 간섭이 존재하는 네트워크의 에너지 효율성을 최대화하기 위한 전송 전력과 전력 분할 비율을 도출하였다. 시뮬레이션 결과는 제안 방안이 효율적인 전력 제어 및 분배를 통해 기존 방안에 비해 높은 에너지 효율성을 달성함을 보여준다.

References

[1] L. Liu, R. Zhang, and K.-C. Chua, "Wireless information and power transfer: A dynamic power splitting approach," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 9, pp. 3990-4001, Sep. 2013.

[2] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov. 2013.

[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. Tut.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Second Quarter 2015.

[4] K. Lee, D.-H. Cho, and B. C. Chung, "Resource allocation method for improving energy efficiency and receiver fairness in wireless networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 5, pp. 826-832, May 2015.

[5] K. Lee and J.-P. Hong, "Resource allocation for maximizing energy efficiency in energy harvesting networks with channel estimation error," *J. KIICE*, vol. 20, no. 3, pp. 506-512, Mar. 2016.

[6] B. Xu, Y. Zhu, and R. Zhang, "Optimized power allocation for interference channel with SWIPT," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 220-223, Apr. 2016.

www.dbpia.co.kr