

무선 전력 기반 멀티홉 네트워크에서 종단간 전송률 최대화를 위한 자원 할당

최 현 호*

Resource Allocation for Maximizing End-to-End Throughput in Wireless Powered Multihop Networks

Hyun-Ho Choi*

요 약

본 논문에서는 무선 전력 기반 멀티홉 네트워크에서 노드간 서로 다른 에너지 사용량과 수확량을 고려하여 종단간 전송률 최대화를 위한 최적의 자원 할당 방식을 제안한다. 제안 방안은 분산적으로 인접 노드간 전송률을 동일하게 맞추는 방식으로 동작하여 모든 링크의 전송률이 같아지도록 각 노드에게 서로 다른 무선 자원을 할당한다. 모의실험 결과 제안 방식은 모든 링크 전송률을 같은 값으로 수렴시키며 종단간 전송률을 기존 동일 자원 할당 방식 대비 크게 향상시킨다.

Key Words : Wireless powered multihop network, wireless energy harvesting, throughput maximization, resource allocation

ABSTRACT

In this letter, we propose an optimal resource allocation scheme for maximizing end-to-end throughput considering different energy usage and harvesting amount in wireless powered multihop networks. The proposed scheme operates in a distributed way that the transmission rates of neighboring nodes become equal, so that different

radio resources are allocated to each node to make all link rate the same. Simulation results show that the proposed method converges all link rates to the same value and significantly improves the end-to-end rate compared to the conventional equal allocation method.

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 센서 노드의 에너지 소비를 줄이기 위하여 목적지까지 직접 전송 대신 멀티홉 전송을 사용한다. 또한 최근에는 무선 전력 전송 기술을 이용하여 송수신하지 않을 때 노드들은 무선으로 에너지를 공급받아 배터리를 충전할 수 있다. 무선 전력을 공급하는 파워 비콘(power beacon)과의 거리에 따라 노드들은 서로 다른 에너지량을 하베스팅하게 되며, 멀티홉으로 연결된 노드간의 거리에 따라 노드들은 서로 다른 에너지량을 소모하게 된다. 이와같은 멀티홉 전송 환경에서 소스에서 목적지까지의 종단간 전송률은 연결된 링크들 중 가장 낮은 전송률을 갖는 링크에 의해 제한되기 때문에 이를 고려한 무선 자원 할당이 필요하다.

지금까지 무선 전력 기반 통신 네트워크에서는 주로 1-홉 또는 2-홉 전송만을 고려하였다. 점대점 단일 또는 다중 안테나 시스템과 full duplex 시스템 등에서 전송률 최대화를 위한 자원 할당 방식이 연구되었다^[1]. 또한 다양한 무선 전력 기반 릴레이 네트워크에서 전송률 최대화 및 아웃티지 최소화를 위한 자원 할당, 중계 노드 선택, 하베스팅 비율 최적화 등의 연구가 수행되었다^[2]. 하지만 3-홉 이상의 멀티홉 전송 환경에서는 이와 같은 연구가 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 무선으로 에너지를 공급받는 멀티홉 전송 네트워크에서 멀티홉 전송을 위한 프레임 구조를 제시하고, 노드간 서로 다른 에너지 수확량과 사용량을 고려하여 종단간 전송률 최대화를 위한 최적의 자원 할당 방식을 제안한다. 제안 방안은 분산적으로 인접 노드간 전송률을 동일하게 맞추는 방식으로 동작하여 모든 링크의 전송률이 같아지도록 각 노드별 무선 자원을 할당한다.

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

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

논문번호 : 201909-201-A-LU, Received September 18, 2019; Revised September 28, 2019; Accepted September 28, 2019

II. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 무선 전력 기반의 멀티홉 네트워크의 시스템 모델을 보여준다. 하나의 파워 비콘과 K -홉을 갖는 $K+1$ 개의 멀티홉 노드로 구성된다. 모든 멀티홉 노드들은 내제된 에너지원 없이 파워 비콘으로부터 송신되는 무선 에너지를 하베스팅하여 송수신에 사용한다. 파워 비콘에서 노드 i 로의 채널 파워 이득은 h_i 로 나타내고, 노드 i 에서 다음 노드 $i+1$ 로의 채널 파워 이득을 g_i 로 나타낸다. 이들 채널 이득은 한 프레임 내에서는 변하지 않는다고 가정한다^[3].

그림 2는 무선 파워 기반 멀티홉 전송을 위한 프레임 구조를 보여준다. 길이 T 를 갖는 프레임은 K 개의 슬롯으로 나누어져 TDMA 방식으로 노드 i 는 i 번째 슬롯을 사용하여 데이터를 전송한다. 편의를 위해 프레임 길이를 정규화하여 $T=1$ 로 가정하고, 사용자 i 에게 할당되는 슬롯 길이를 τ_i 로 나타낸다. 따라서 τ_i 는 다음과 같은 제약 조건을 갖는다.

$$\sum_{i=1}^K \tau_i \leq 1, \tau_i \geq 0 \quad (1)$$

소스 노드 1에서 목적지 노드 $K+1$ 까지 순서대로 decode-and-forward 방식을 사용하여 멀티홉 전송을 수행한다. 즉, 노드 i 는 τ_{i-1} 시간 동안 노드 $i-1$ 로

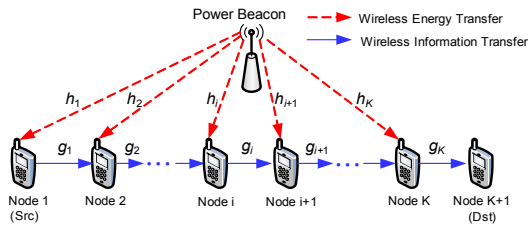


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

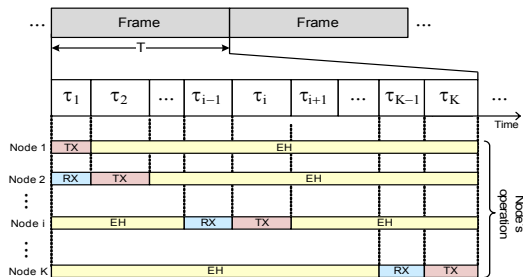


그림 2. 프레임 구조
Fig. 2. Frame structure

부터 데이터를 수신하고, τ_i 시간 동안 노드 $i+1$ 에게 데이터를 송신한다. 이 송수신 시간을 제외한 나머지 시간 동안 노드 i 는 파워 비콘으로부터 에너지를 하베스팅한다. 따라서 한 프레임 동안 노드 i 가 하베스팅하는 에너지는 다음과 같다.

$$E_i = \zeta_i P h_i (1 - \tau_i - \tau_{i-1}), \quad i = 1, \dots, K, \tau_0 = 0 \quad (2)$$

여기에서 P 는 파워 비콘의 송신 파워이며 ζ_i 는 하베스팅 효율을 나타낸다.

노드 i 는 이 에너지를 다음번 데이터 송수신에 사용하는데, 데이터를 전송하는 τ_i 시간동안 사용되는 송신파워는 다음과 같다.

$$P_i = \frac{\eta_i E_i}{\tau_i}, \quad i = 1, \dots, K \quad (3)$$

여기에서 $0 < \eta_i < 1$ 는 하베스팅한 전체 에너지 중 송신에 사용되는 에너지의 비율이다. 각 노드는 수신사전에 알려진 신호인 파워 비콘 신호를 제거할 수 있다는 가정 하에 노드 i 에서 노드 $i+1$ 로의 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_i(\vec{\tau}) &= \tau_i \log_2 \left(1 + \frac{g_i P_i}{\Gamma \sigma^2} \right) = \tau_i \log_2 \left(1 + \frac{g_i \zeta_i P h_i (1 - \tau_i - \tau_{i-1})}{\Gamma \sigma^2 \tau_i} \right) \\ &= \tau_i \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i (1 - \tau_i - \tau_{i-1})}{\tau_i} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 벡터 $\vec{\tau} = [\tau_1 \tau_2 \dots \tau_K]$ 이며, Γ 는 SNR gap, σ^2 는 노이즈 파워를 나타낸다. 또한 상수 $\gamma_i = \frac{\zeta_i h_i g_i P}{\Gamma \sigma^2}$ 로 정의된다.

III. 종단간 처리율 최대화를 위한 자원 할당

멀티홉 전송에서 종단간 전송률은 전송률이 가장 낮은 링크에 의해서 제한되므로 다음과 같이 결정된다.

$$R_{e2e} = \min R_i(\vec{\tau}), \quad i = 1, \dots, K \quad (5)$$

따라서 종단간 전송률을 최대화하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \max_{\vec{\tau}} R_{e2e} &= \max_{\vec{\tau}} \min R_i(\vec{\tau}), \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^K \tau_i &\leq 1, \tau_i \geq 0, i=1, \dots, K \end{aligned} \quad (6)$$

식 (1)과 (4)로부터 τ_i 가 증가하면 R_i 는 증가하나 반대로 $R_j, \forall j \neq i$ 는 감소함을 알 수 있다. 이러한 경우 식 (6)과 같은 max-min 문제의 최적 해는 모든 전송률이 동일한 경우(즉, $R_i = R_j, \forall i, j$)가 된다⁴¹. 이 조건을 만족시키는 최적의 $\vec{\tau}$ 를 구하기 위하여 새 떼가 분산적으로 속도를 동일하게 만드는 행동을 모방한 flocking 알고리즘을 적용한다⁴². 새들은 주변 새들과 속도를 동일하게 맞추기 위하여 local average 알고리즘을 취하는데, 이와 유사하게 우리는 노드 i 의 전송률 R_i 를 주변 이웃 노드의 전송률의 평균으로 맞춘다. 따라서 노드 i 의 $n+1$ 번째 전송률 $R_i(n+1)$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$R_i(n+1) = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} R_j(n) \quad (7)$$

여기에서 N_i 는 노드 i 의 이웃 노드 집합을 나타낸다. 또한 식 (4)를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_i(n+1) &= \tau_i(n+1) \log_2 \left\{ 1 + \frac{\gamma_i(1-\tau_i(n+1)-\tau_{i-1}(n))}{\tau_i(n+1)} \right\} \\ &= \tau_i(n+1) \log_2 \left\{ 1 - \gamma_i + \frac{\gamma_i(1-\tau_{i-1}(n))}{\tau_i(n+1)} \right\} \\ &= \tau_i(n+1) \log_2 \left\{ 1 - \gamma_i + \frac{\beta_i}{\tau_i(n+1)} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 $\beta_i = \gamma_i(1-\tau_{i-1}(n))$ 로 정의된다. 식 (7)에서 구한 $R_i(n+1)$ 값을 식 (8)에 대입하면 노드 i 의 다음 번 할당 시간 $\tau_i(n+1)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_i(n+1) = \frac{-\beta_i}{1-\gamma_i + \frac{\beta_i}{\ln 2 R_i(n+1)} W \left(\frac{-\ln 2 R_i(n+1)}{\beta_i} e^{-\frac{\ln 2 R_i(n+1)}{\beta_i}} \right)} \quad (9)$$

여기에서 W 는 Lambert W 함수를 나타낸다. 따라서 R_{e2e} 의 최대화를 위해서는 모든 링크의 전송률이 동일하게 될 때까지(즉, $R_i = R_j, \forall i, j$) 식 (7)-(9)의 반복 동작을 수행하여 수렴된 최적의 $\vec{\tau}$ 를 구한다.

IV. 실험 결과 및 결론

성능 평가를 위하여 선형 멀티홉 토폴로지를 고려하였다. 노드간 거리를 1~10 m 사이에서 랜덤하게 정하고, 파워 비콘과 멀티홉 링크와의 직선거리를 10 m로 설정하였다. $P=46$ dBm, $\zeta_i=0.8$, $\eta_i=0.9$, $\Gamma=9.8$ dB, $\sigma^2=-160$ dBm/Hz, noise figure는 9 dB, 채널 대역폭은 1 MHz를 사용하였다⁴³. 채널 파워 이득은 $h_i = g_i = Gd_i^{-n}$ 으로 결정되며, 여기에서 G 은 1 m에서의 파워 감쇄 기준으로 -30 dB로 주어지며, d_i 는 노드간 거리, n 은 pathloss exponent 값으로 2.5로 설정된다.

그림 3은 제안 방식의 반복 횟수에 따라 각 노드의 링크 전송률과 슬롯 길이의 변화를 보여준다. 시간이 지날수록 의도한대로 모든 링크의 전송률이 동일하게 맞춰지는 것을 확인할 수 있으며, 이와 대조적으로 슬롯 길이는 서로 다른 값으로 수렴하게 된다. 초기에 링크 전송률이 가장 높았던 노드 4는 가장 짧은 슬롯을 사용하게 되고, 링크 전송률이 가장 낮았던 노드 2는 가장 긴 슬롯을 사용하게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 노드간 협력하여 모든 링크의 전송률이 같아지는 방식으로 각 노드에게 서로 다른 자원이 할당된다.

그림 4는 홉 수에 따른 중단간 전송률을 보여준다. 기준과 같이 모든 노드에게 동일한 슬롯 길이를 할당하는 방식 대비 링크 전송률을 동일하게 맞추도록 슬롯 길이를 차별화는 제안 방식이 중단간 전송률을 보다 향상시킬 수 있다. 따라서 제안하는 멀티홉

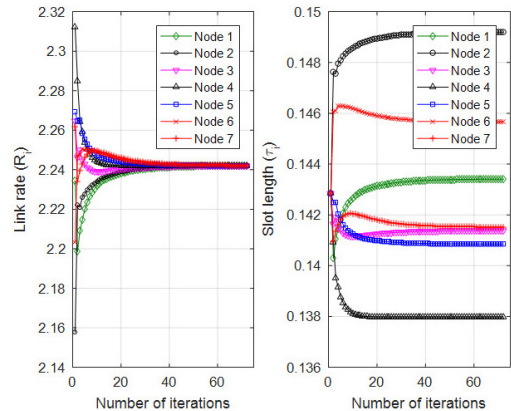


그림 3. 반복 횟수에 따른 노드별 (a) 링크 전송률(R_i)과 (b) 슬롯 길이(τ_i)의 변화

Fig. 3. Change of (a) link rate and (b) slot length for each node vs. number of iterations

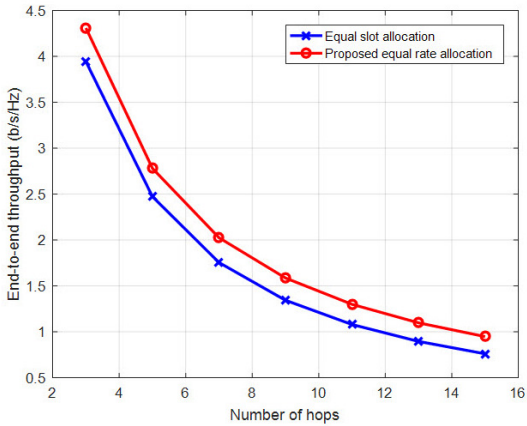


그림 4. 홵 수 증가에 따른 종단간 전송률
 Fig. 4. End-to-end throughput vs. number of hops

자원 할당 방식은 무선 전력 기반 멀티홵 환경에서 모든 링크 전송률을 동일하게 만들어 최소 링크 전송률을 최대화시킴으로써 기존 동일 자원 할당 방식 대비 종단간 전송률을 향상시킨다.

References

- [1] J. Hu, et al., "Integrated data and energy communication network: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3169-3219, Jul. 2018.
- [2] X. Lu, et al., "Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Nov. 2014.
- [3] H.-H. Choi, "Optimal resource allocation for random access in wireless-powered communication networks," *J. KICS*, vol. 42, no. 10, pp. 1951-1954, Oct. 2017.
- [4] F. Cucker and S. Smale, "Emergent behavior in flocks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.