

무선 멀티 홉 통신에서 협력적인 무선 에너지 공유를 통한 생존시간 최대화

Lifetime Maximization with Cooperative Wireless Energy Sharing in Wireless Multi-Hop Communications

Hyun-Ho Choi*

*Professor, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

ABSTRACT

In this paper, we maximize the lifetime of a multi-hop path through a cooperative wireless energy sharing scheme between constituent nodes in a wireless multi-hop communication. Considering a bidirectional multi-hop communication environment, we present an optimization problem to maximize path lifetime by adjusting the amount of energy each node needs to share with its neighboring nodes. On the basis of solidarity property, i.e., the lifetime of the multi-hop path is maximized when the lifetimes of all nodes are the same, we convert the considered optimization problem into a linear programming problem and solve it easily. Simulation result shows that the proposed two-way wireless energy sharing method maximizes the path lifetime of multi-hop communications and approximately doubles the path lifetime compared with the one-way energy sharing method.

Keywords : Wireless energy sharing, wireless energy transfer, wireless energy harvesting, lifetime maximization, multi-hop communications.

I. 서 론

최근 무선 에너지 전송(wireless energy transfer, WET) 및 무선 에너지 수확(wireless energy harvesting, WEH) 기술은 무선 주파수 자원을 이용하여 에너지를 전

송 및 충전할 수 있어 무선 노드의 배터리 충전 문제를 해소할 수 있는 기술로 많은 각광을 받고 있다 [1]. 초기에는 peer-to-peer 토폴로지와 two-hop relay 환경에서 wireless powered communication network (WPCN)과 simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) 기반의 시스템 최적화 연구가 많이 수행되었으나 [2], 최근에는 이러한 연구가 멀티 홉 네트워크로 확장되고 있다. 멀티 홉 네트워크에서는 WET를 활용하여 전송 홉 수를 최대화하거나 [3], 중단 간 처리율 [4] 또는 에너지 효율을 최대화하는 연구가 주로 수행되었다 [5].

멀티 홉 통신에서는 한 단말의 에너지 소진만으로도 연결이 끊어지므로 각 노드의 에너지 상태나 소모량에 더 민감하다. 지금까지의 주된 연구는 멀티 홉 네트워크의 수명을 늘리기 위하여 전송 전력 제어, 자원관리, 라우팅에 초점을 맞추어왔다 [6]. 하지만 본 연구에서는 최근 이슈가 되고 있는 WET와 WEH 기술을 멀티 홉 통신 상황에 적용하여 멀티 홉 경로의 생존시간을 최대화하고자 한다. 최근 연구 결과는 멀티 홉 환경에서도 WEH 및 WPT 기술을 사용하여 상당한 에너지 절약이 가능함을 실험적으로 보여주었다 [3]-[5]. 본 논문에서는 무선 멀티 홉 통신 환경에서 구성 노드들 간 협력적으로 무선 에너지를 공유(wireless energy sharing, WES) 하여 멀티 홉 경로의 생존시간을 최대화하는 것을 목표로 한다. 양방향 멀티 홉 통신을 고려하여 각 노드가 이웃 노드와 공유해야 할 에너지량을 조절함으로써 경로 생존시간을 최대화하는 최적화 문제를 제시한다. 이를 해결하기 위하여 멀티 홉 노드들의 생존시간이 서로 연대성을 가짐을 보이고, 모든 노드의 생존시간이 같아질 때 멀티 홉 경로의 생존시간이 최대화되는 성질을 이용한다. 이를 통해 고려하는 최적화 문제를 선형 프로그래밍(linear programming, LP) 문제로 변환하여 최적의 노드 간 에너지 공유량을 도출한다. 모의실험 결과 제안하는 양방향 WES 기법은 모든 구성 노드의 생존시간을 동일하게 만들어 경로 생존시간을 최대화하며, 단방향 WES 방식 대비 경로 생존시간을 대략 두 배 향상시킨다.

Received 26 September 2020, Revised 6 October 2020, Accepted 15 October 2020

* Corresponding Author Hyun-Ho Choi(E-mail: hhchoi@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5297)

Professor, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.11.1550>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

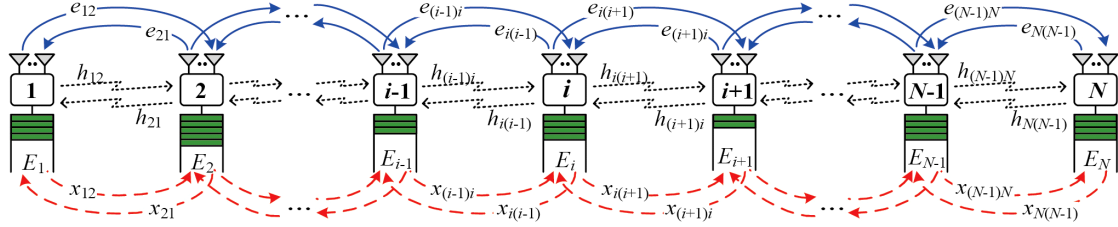


Fig. 1 System model for multi-hop communication using the proposed cooperative WES.

II. 시스템 모델

그림 1은 제안하는 협력적 WES를 사용하는 멀티 홉 통신의 시스템 모델을 보여준다. N 개의 노드들이 서로 멀티 홉으로 연결되어 1번 노드와 N 번 노드가 양방향으로 $N-2$ 개의 중계 노드를 거쳐 데이터를 주고 받는다 [7]. 1번 노드는 주기적으로 정해진 크기의 데이터 패킷을 발생시키고, 이 패킷은 중계 노드를 거쳐 N 번 노드에 도착한다. N 번 노드는 이에 대한 응답에 해당하는 데이터 패킷을 만들어 1번 노드에게 전송한다. 이러한 양방향 멀티 홉 통신 과정에서 각 노드는 양쪽의 이웃 노드들과 무선 정보 전송 (wireless information transmission, WIT)을 수행한 후 에너지를 공유하기 위하여 일정 시간 동안 WET를 수행한다. 이 때 각 노드의 패킷 전송 시간은 사전에 계산되어 스케줄링기반으로 할당되어 단말간 전송 충돌은 없다고 가정한다 [4]. 또한 각 노드는 이동성이 없는 정적 노드로 전송 주기 동안 채널 변화가 거의 없는 quasi-static 페이딩을 가정한다.

Shannon 용량 식으로부터 노드 i 에서 노드 j 로의 가능한 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$r_{ij} = W \log_2 \left(1 + \frac{P h_{ij}}{\sigma^2} \right) \text{ for } (i,j) \in M, \quad (1)$$

$$M = \left\{ (1,2), (2,3), \dots, (N-1,N), (2,1), (3,2), \dots, (N,N-1) \right\}$$

여기서 W 는 채널 대역폭, P 는 각 노드에서 사용하는 고정 송신 전력값, h_{ij} 는 노드 i 에서 j 로의 채널 파워 이득, σ^2 은 노이즈 파워, M 은 연결된 노드 쌍의 집합을 나타낸다. 양방향으로 전송되는 패킷 크기가 S 로 주어질 때 노드 i 가 노드 j 에게 한 패킷을 전송하는데 필요로 하는 WIT 시간은 다음과 같이 결정된다.

$$t_{ij} = \frac{S}{r_{ij}}, \quad (i,j) \in M \quad (2)$$

또한 노드 i 가 이 WIT를 수행하는데 소모하는 에너지량은 다음과 같이 주어진다.

$$e_{ij} = P t_{ij}, \quad (i,j) \in M \quad (3)$$

이웃 노드 i 가 이웃노드 $j = \{i-1, i+1\}$ 에게 WET를 통하여 에너지를 전송할 때 i 에서 j 로 전송하는 에너지량을 x_{ij} 라고 하면 노드 j 가 i 로부터 받는 에너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$y_{ji} = \eta h_{ij} x_{ij}, \quad (i,j) \in M \quad (4)$$

여기에서 $0 < \eta < 1$ 는 에너지 하베스팅 효율을 나타낸다. 따라서 노드 i 가 이웃 노드 $j = \{i-1, i+1\}$ 와 WES를 수행함으로써 변화하는 에너지 총량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta_i = -x_{i(i+1)} - x_{i(i-1)} + y_{i(i+1)} + y_{i(i-1)} = -x_{i(i+1)} - x_{i(i-1)} + \eta h_{(i+1)i} x_{(i+1)i} + \eta h_{(i-1)i} x_{(i-1)i} \quad (5)$$

고려하는 양방향 멀티 홉 통신에서 1번 노드와 N 번 노드가 서로 하나씩 패킷을 주고받을 때를 한 번의 전송 사이클이라고 하면, 노드 i 의 생존시간은 노드 i 의 에너지가 모두 소비되기 전까지 제공 가능한 전송 사이클의 수로 정의될 수 있다 [6]. 이는 노드 i 가 몇 개의 양방향 패킷을 전달할 수 있는가를 의미한다. 이때, 노드 i 가 한 전송 사이클 동안에 소비하는 에너지의 총량은 다음과 같다.

$$C_i = e_{i(i+1)} + e_{i(i-1)} + \zeta_i \quad (6)$$

여기에서 ζ_i 는 노드 i 가 패킷 송신 외에 패킷을 수신하고 처리하는데 소비되는 에너지량을 나타낸다. 따라서 초기에 노드 i 에게 주어진 배터리 에너지량을 E_i 라 할 때, WES 수행 후 노드 i 의 남은 에너지량은 $E_i + \Delta_i$ 가 되므로 노드 i 의 생존시간은 다음과 같이 결정된다.

$$L_i = \frac{E_i + \Delta_i}{C_i} = \frac{E_i - x_{i(i+1)} - x_{i(i-1)} + y_{i(i+1)} + y_{i(i-1)}}{e_{i(i+1)} + e_{i(i-1)} + \zeta_i} = \frac{E_i - x_{i(i+1)} - x_{i(i-1)} + \eta h_{(i+1)i} x_{(i+1)i} + \eta h_{(i-1)i} x_{(i-1)i}}{e_{i(i+1)} + e_{i(i-1)} + \zeta_i} \quad (7)$$

선형 멀티 홉 통신의 수명은 가장 짧은 생존시간을 갖는 노드에 의해 제한되므로 멀티 홉 경로 생존시간은 $L_{path} = \min\{L_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$ 으로 결정된다 [6]. 따라서 멀티 홉 경로의 생존시간을 최대화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\max_X L_{path} = \max_X \min\{L_i\}, i = \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

여기에서 $X = [x_{ij}]$ 는 노드 i 에서 노드 j 로 전송하는 에너지 량의 벡터를 나타내며, 우리는 최적 X 를 구하고자 한다.

III. 최적의 협력 WES 솔루션

(8)의 max-min 최적화 문제를 풀기 위하여 우리는 각 노드의 생존시간이 서로 연대성(solidarity property)을 가지고 있음에 착안한다 [8]. 즉, 노드 i 가 자신의 수명을 증가시키기 위하여 공유하는 에너지량 x_{ij} 값을 줄이면 (4)에 의해 다른 노드 $j \neq i$ 의 에너지 하베스팅 량이 감소하게 되고 이는 (7)에 의해 다른 노드 $j \neq i$ 의 수명을 단축시킨다. 반대로 노드 i 가 자신의 수명을 줄이기 위하여 x_{ij} 값을 증가시키면 다른 노드 $j \neq i$ 의 수명은 증가하게 된다. 이와 같이 어떤 집단을 구성하는 각 요소의 속성 값이 서로 연대성을 갖는 경우 그 속성 값들의 최소 값을 최대화하기 위해서는 모든 요소의 속성 값을 서로 동일하게 만들면 된다는 사실이 알려져 있다 [8]. 이러한 연대성을 이용하면 (8)의 max-min 최적화 문제는 다음과 같은 최대화 문제로 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{T_i} \{L_i\}, i \in \{1, 2, \dots, N\} \\ \text{s.t. } L_1 = L_2 = \dots = L_N, X \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

이제 (9)의 $L_i = L_{i+1}$ 조건과 (7)로부터 다음과 같은 선형방정식을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\eta h_{(i-1)i}}{C_i} x_{(i-1)i} - \frac{1}{C_i} x_{i(i-1)} - \left(\frac{1}{C_i} + \frac{\eta h_{i(i+1)}}{C_{i+1}} \right) x_{i(i+1)} \\ + \left(\frac{\eta h_{(i+1)i}}{C_i} + \frac{1}{C_{i+1}} \right) x_{(i+1)i} + \frac{1}{C_{i+1}} x_{(i+1)(i+2)} \\ - \frac{\eta h_{(i+2)(i+1)}}{C_{i+1}} x_{(i+2)(i+1)} = \frac{E_{i+1}}{C_{i+1}} - \frac{E_i}{C_i} \end{aligned} \quad (10)$$

이 선형 식으로부터 (9)의 최적화 문제는 다음과 같은 LP 문제로 변환된다.

$$\begin{aligned} \max_X C^T X, \\ \text{s.t. } AX = B, X \geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 행렬 A 의 i 번째 행과 벡터 X, B, C 는 다음과 같이 주어진다.

$$A_i = \begin{bmatrix} 0, \dots, 0, \frac{\eta h_{(i-1)i}}{C_i}, -\frac{1}{C_i}, -\left(\frac{1}{C_i} + \frac{\eta h_{i(i+1)}}{C_{i+1}}\right), \\ \left(\frac{\eta h_{(i+1)i}}{C_i} + \frac{1}{C_{i+1}}\right), \frac{1}{C_{i+1}}, -\frac{\eta h_{(i+2)(i+1)}}{C_{i+1}}, 0, \dots, 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$X = [x_{12}, x_{21}, \dots, x_{(i-1)i}, x_{i(i-1)}, x_{i(i+1)}, x_{(i+1)i}, \dots, x_{(N-1)N}, x_{N(i-1)}] \quad (13)$$

$$B = \left[\frac{E_2}{C_2} - \frac{E_1}{C_1}, \dots, \frac{E_{i+1}}{C_{i+1}} - \frac{E_i}{C_i}, \dots, \frac{E_N}{C_N} - \frac{E_{N-1}}{C_{N-1}} \right] \quad (14)$$

$$C = [0, \dots, 0, \eta h_{(i-1)i}, -1, -1, \eta h_{(i+1)i}, 0, \dots, 0] \quad (15)$$

이제 알려진 LP solver를 이용하여 (11) 형태의 문제를 손쉽게 풀어 각 노드의 최적 에너지 전송량 $X = [x_{ij}]$ 를 구할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위하여 $P=23$ dBm, $\eta_i=0.5$, $\sigma^2=-165$ dBm/Hz, $W=100$ kHz, $S=10$ kbits를 사용하였다 [9]. 채널 파워 이득 $h_{ij} = Gd_{ij}^{-\alpha}$ 로 결정되며, 여기에서 기준 감쇄 $G=-30$ dB, 경로감쇄 지수 $\alpha=2.7$ 로 주어진다. 인접 노드간 거리 $d_{i(i+1)}$ 은 0.5~3 m 사이에서 변화하며 기본 값은 1 m로 설정된다. 또한 노드의 초기 에너지량 E_i 는 $1 \sim B_{max}$ Joule 사이에서 랜덤하게 결정되며 B_{max} 는 기본 값 100 J로 주어지며 10~1000 J에서 변화된다.

그림 2는 전송 홉 수(N), 인접 노드간 거리 $d_{i(i+1)}$, 노드의 최대 배터리 량(B_{max})에 따른 멀티 홉 경로의 생존 시간을 보여준다. 기존의 멀티 홉 노드 간 WET를 전혀 하지 않는 Non-WET 방식은 모든 경우에 가장 낮은 성능을 보여주며, 노드 i 에서 $i+1$ 로의 단방향으로만 에너지를 전송하는 WET 방식은 에너지 공유가 제한적으로 이루어져 성능이 약간 증가함을 볼 수 있다. 반면 제안하는 양방향 WES를 사용하는 경우 경로 생존시간을 최대화함으로써 단방향 WET 보다 약 두 배 정도 생존시간이 증가함을 볼 수 있다. 홉 수가 증가함에 따라 노드들의 생존시간이 더 다양하게 분포하여 경로 생존시간이 점점 감소하는 경향을 보였고, 인접 노드간 거리가

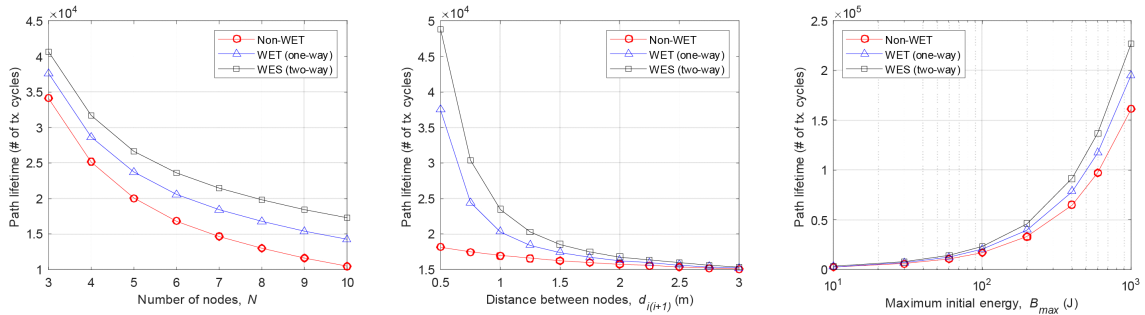


Fig. 2 Path lifetime vs. number of nodes (N), distance between nodes ($d_{i(i+1)}$), and maximum initial energy (B_{max}).

증가할수록 수집하는 에너지 양이 감소하여 생존시간이 감소함을 보였다. 반면 최대 배터리 양이 증가함에 따라 노드들의 초기 에너지가 높은 수준에서 분포하여 경로 생존시간이 증가함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 양방향 멀티 홉 통신 환경에서 WET 기술을 기반으로 노드 간 협력적으로 에너지를 공유하여 경로 생존시간을 최대화 하였다. 수학적 분석을 통하여 멀티 홉 경로의 생존시간 최대화 문제를 단순한 LP 문제로 변환하여 노드 간 최적의 에너지 공유량을 찾을 수 있었다. 제안하는 협력적 WES 방식은 멀티 홉 통신 중에 인접 단말들 간 양방향으로 에너지를 교환함으로써 기존의 에너지 공유를 하지 않거나, 단방향으로만 에너지를 공유하는 방식 대비 경로 생존시간을 크게 향상시킬 수 있었다. 제안한 협력적 WES 기법은 향후 멀티 홉 전송을 수행하는 애드혹 네트워크의 생존시간을 향상시키는데 사용될 수 있으리라 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019R1A2C4070466).

REFERENCES

[1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless

charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1413 - 1452, 2015.

[2] H.-H. Choi, "Prioritized Random Access Control for Fairness Improvement in Wireless-Powered Communication Networks," *Journal of KIICE*, vol. 22, no. 1, pp. 175-182, Jan. 2018.

[3] E. Chen, M. Xia, D. B. da Costa, and S. A'issa, "Multi-hop cooperative relaying with energy harvesting from cochannel interferences," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 1199 - 1202, May 2017.

[4] R. Fan, S. Atapattu, W. Chen, Y. Zhang, and J. Evans, "Throughput maximization for multi-hop decode-and-forward relay network with wireless energy harvesting," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24582 - 24595, Apr. 2018.

[5] K. M. Rabie, B. Adebisi, A. M. Tonello, and G. Nauryzbayev, "For more energy-efficient dual-hop DF relaying power-line communication systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 2005 - 2016, June 2017.

[6] H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar, and L. H. Hanzo, "A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 828 - 854, Jan. 2017.

[7] N. Sharoon, "Dynamic Path construction in Multi-Hop Wireless Networks", *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, HSST, ISSN : 2508-9080, vol. 2, no. 2, June 2016.

[8] B. Radunovic and J.-Y. Le Boudec, "Rate performance objectives of multihop wireless networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 334 - 349, Oct. 2004.

[9] H.-H. Choi, "Wireless-Powered Cooperative Multihop Transmission Method," in *Proceeding of the KIICE Conference 2018 Fall*, pp. 499-502, Oct. 2018.