

# 선형 멀티 홉 네트워크에서 생존시간 최대화를 위한 협력적 무선 에너지 전송

최 현 호\*

## Cooperative Wireless Energy Transfer for Maximizing Lifetime in Linear Multi-Hop Networks

Hyun-Ho Choi\*

요 약

본 논문에서는 멀티 홉 네트워크의 생존시간을 최대화하기 위하여 노드 간 에너지를 공유하는 협력적 무선 에너지 전송 기법을 제안한다. 각 노드가 주어진 데이터를 전송한 후 에너지를 전송할 수 있을 때 멀티 홉 네트워크의 수명을 최대화하기 위한 시스템 모델과 최적화 문제를 제시한다. 멀티 홉 노드의 연대성을 이용하여 복잡한 최적화 문제를 선형 계획법 문제로 변환하고 최적의 에너지 전송 시간을 도출한다. 제안하는 협력적 무선 에너지 전송 방식은 기존 비협력적 에너지 전송 방식 대비 네트워크 생존시간을 크게 향상시킨다.

**Key Words** : Wireless energy transfer, wireless energy harvesting, multi-hop network, lifetime.

ABSTRACT

In this letter, we propose a cooperative wireless energy transfer (WET) scheme in which nodes share their energy to maximize the lifetime of multi-hop network. When each node can transmit energy after transmitting given data, a system model and an optimization problem are presented to maximize the lifetime of a multi-hop network. By using the

solidarity of multi-hop nodes, this problem is converted into a linear programming problem and then the optimal WET time is derived. Results show that when the proposed cooperative WET method significantly improves the network lifetime compared to the conventional non-cooperative WET method.

## I. 서 론

최근 무선 에너지 전송(wireless energy transfer, WET) 및 무선 에너지 수확(wireless energy harvesting, WEH) 기술은 무선 주파수를 사용하여 에너지를 전송 및 충전할 수 있어 무선 노드의 배터리 충전의 불편함을 해소할 수 있는 기술로 많은 각광을 받고 있다<sup>1)</sup>. 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 수행되었고, 최근에 이러한 연구가 멀티홉 네트워크로 확장되고 있다. 멀티 홉 네트워크에서는 WET를 활용하여 전송 홉 수를 최대화하거나, 종단 간 처리율 또는 에너지 효율을 최대화하는 연구가 주로 수행되었다<sup>2)</sup>.

멀티 홉 네트워크는 한 단말의 에너지 소진만으로도 네트워크가 단절되므로 각 노드의 에너지 상태나 소모량에 더 민감하다. 지금까지의 주된 연구는 멀티 홉 네트워크의 수명을 늘리기 위하여 전송 전력 제어, 자원관리, 라우팅에 초점을 맞추어왔다<sup>3)</sup>. 하지만 본 연구에서는 최근 이슈가 되고 있는 WET와 WEH 기술을 멀티 홉 네트워크에 적용하여 네트워크 생존시간을 최대화 하고자 한다. 최근 연구로 멀티 홉 네트워크에서도 WEH 및 WPT를 사용하여 상당한 에너지를 절약할 수 있음이 실험적으로 입증되었다<sup>2)</sup>. 본 논문에서는 멀티 홉 구성 노드들 중 에너지가 많은 노드가 에너지가 적은 노드에게 WET를 수행하는 협력적인 무선 에너지 전송 기법을 제안한다. 선형 멀티 홉 토폴로지를 고려하여 생존기간 최대화를 위한 시스템 모델을 제시하고 노드별 최적 WET 시간을 도출한다. 모의실험을 통하여 협력적 WET를 사용할 때 기존 비협력적 방식 대비 네트워크 수명이 크게 향상되었음을

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

• First Author : (ORCID:0000-0002-6785-2596) Hankyong National University, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 정교수, 중신회원

논문번호 : 202009-228-A-LU, Received September 21, 2020; Revised September 27, 2020; Accepted September 28, 2020

확인한다.

## II. 시스템 모델

그림 1은 제안하는 협력적 WET를 사용하는 멀티 홉 전송의 시스템 모델을 보여준다. 소스에서 목적지까지  $N$ -홉을 갖는 선형 멀티 홉 토폴로지를 고려한다. 각 노드는 무선 정보 전송 (wireless information transmission, WIT)을 수행한 후 일정 시간동안 WET를 수행할 수 있다. WIT와 WET의 송수신에 참여하지 않는 다른 노드들은 WEH를 수행하여 배터리를 충전한다. 소스는 주기적으로 정해진 크기의 데이터 패킷을 발생시키고 중계 노드들을 거쳐 최종 목적지까지 전달한다. 각 노드의 패킷 전송 시간은 사전에 계산되어 스케줄링기반으로 할당되어 단말 간 전송 충돌은 없다고 가정한다<sup>1)</sup>. 또한 각 노드는 이동성이 없는 정적 노드로 전송 주기 동안 채널 변화가 거의 없는 quasi-static 페이딩을 가정한다.

Shannon 용량 공식으로부터 노드  $i$ 에서 노드  $i+1$ 로의 가능한 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R_i = W \log_2 \left( 1 + \frac{Ph_{i(i+1)}}{\sigma^2} \right) \quad (1)$$

여기에서  $W$ 는 채널 대역폭,  $P$ 는 각 노드에서 사용하는 고정 송신 전력값,  $h_{ij}$ 는 노드  $i$ 에서  $j$ 로의 채널 파워 이득,  $\sigma^2$ 은 노이즈 파워를 나타낸다. 따라서 전송해야할 패킷 크기가  $S$ 로 주어질 때 노드  $i$ 가 필요로 하는 WIT 시간은 다음과 같이 결정된다.

$$T_i^d = \frac{S}{R_i} \quad (2)$$

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

$$C_i^d = PT_i^d \quad (3)$$

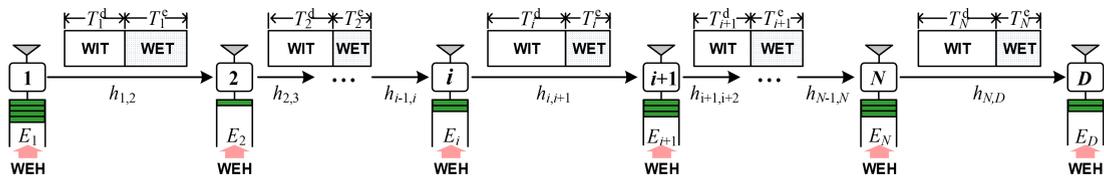


그림 1. 제안 협력적 WET를 사용하는 멀티 홉 전송의 시스템 모델

Fig. 1. System model for multi-hop transmission using the proposed cooperative WET.

아울러 데이터 패킷이 소스에서 목적지까지 전송될 때 노드  $i$ 가 송수신에 참여하지 않는 시간 동안 하베스팅하는 에너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$H_i^d = \eta_i \sum_{j \neq i-1, i} Ph_{ji} T_j^d \quad (4)$$

여기에서  $0 < \eta_i < 1$ 는 노드  $i$ 의 에너지 하베스팅 효율을 나타낸다.

변수  $T_i^e$ 를 노드  $i$ 에서 WET를 수행하는 시간이라고 할 때, 노드  $i$ 가 이 WET로 인하여 소비되는 에너지량은 다음과 같이 결정된다.

$$C_i^e = PT_i^e \quad (5)$$

또한 각 노드의 WET로부터 노드  $i$ 가 하베스팅할 수 있는 에너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$H_i^e = \eta_i \sum_{j \neq i} Ph_{ji} T_j^e \quad (6)$$

따라서 하나의 데이터 패킷이 소스에서 목적지까지 전달될 때 노드  $i$ 의 에너지 변화량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta_i = -C_i^d + H_i^d - C_i^e + H_i^e \quad (7)$$

노드의 생존시간은 노드가 에너지를 다 소모하기 전까지 전송한 패킷의 개수라고 정의내릴 수 있다<sup>2)</sup>. 따라서 초기에 노드  $i$ 에게 주어진 배터리 에너지량을  $E_i$ 라 할 때, 노드  $i$ 의 생존시간은 다음과 같이 결정된다.

$$L_i = \frac{E_i}{-\Delta_i} = \frac{E_i}{C_i^d + C_i^e - H_i^d - H_i^e} \quad (8)$$

선형 멀티 홉 네트워크의 수명은 가장 짧은 생존시간을 갖는 노드에 의해 제한되므로 네트워크의 생존



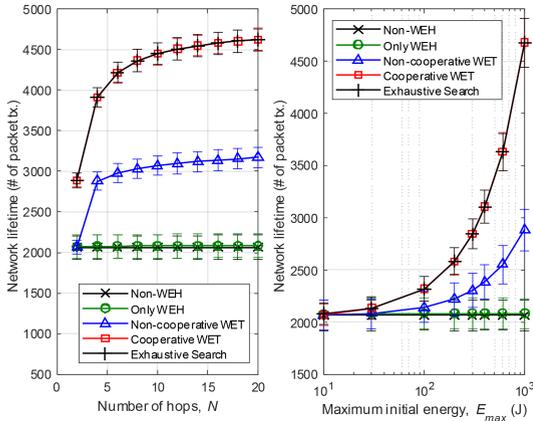


그림 2. 홉 수( $N$ )과 최대 에너지 값( $E_{max}$ )에 따른 네트워크 생존시간  
 Fig. 2. Network lifetime vs.  $N$  and  $E_{max}$ .

이 점점 증가하는 경향을 보였고, 초기 에너지량이 증가함에 따라 생존시간이 급격히 증가함을 확인하였다.

### V. 결론

본 논문에서는 수학적 분석을 통해 멀티 홉 네트워크의 생존시간을 최대화하는 최적의 WET 시간을 구하였다. 제안하는 협력적 WET 방식은 멀티 홉 단말 간 남은 에너지를 서로 교환함으로써 기존의 비협력적 방식대비 네트워크 생존시간을 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 협력 방식은 에너지가 많은 노드의 경우에는 손해가 될 수 있지만 연결된 멀티 홉 경로의 생존시간 측면에서는 이득이 된다. 향후에는 이러한 협력적 WET의 개념을 노드의 이동성이 존재하는 모바일 멀티 홉 네트워크에 적용하여 실제 동작 및 성능을 살펴볼 계획이다.

### References

- [1] H.-H. Choi, "Wireless multihop transmission scheme based on cooperative energy harvesting for lifetime increase," *J. KICS*, vol. 44, no. 9, pp. 1682-1685, Sep. 2019.
- [2] D. K. P. Asiedu, H. Lee, and K.-J. Lee, "Simultaneous wireless information and power transfer for decode-and-forward multihop relay systems in energy-constrained IoT networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 6, pp. 9413-9426, Dec. 2019.
- [3] 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. Surv. Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 828-854, Jan. 2017.
- [4] B. Radunovic and J.-Y. Le Boudec, "Rate performance objectives of multihop wireless networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 334-349, Oct. 2004.