

무선 전력공급 기반 협력적 멀티홉 전송 방법

최현호

국립한경대학교 전기전자제어공학과

Wireless-Powered Cooperative Multihop Transmission Method

Hyun-Ho Choi

Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

E-mail : hhchoi@hknu.ac.kr

요 약

선형 네트워크 토폴로지에서 노드간 협력을 이용한 무선 전력공급 기반 멀티홉 전송 방식을 제안한다. 제안 프로토콜은 멀티홉 경로의 생존시간의 최대화를 목적으로 멀티홉 노드의 생존시간을 동일하게 맞추어 주도록 노드별 에너지 전송 시간을 결정한다. 각 노드의 생존시간을 동일하게 만들기 위하여 새 떼가 동일 속도로 날아다니는 행동양식을 모방한 flocking 알고리즘을 적용하여 노드의 생존시간을 지역적으로 분산 평균화 시킨다. 시뮬레이션을 통하여 제안 알고리즘이 각 노드의 생존시간을 모두 동일하게 만들어 전체 경로의 생존시간을 최대화할 수 있음을 보여준다.

ABSTRACT

We propose a wireless-powered multihop transmission scheme using inter-node cooperation in a linear network topology. The proposed protocol determines the energy transfer time for each node to make the lifetime of the each node be equal in order to maximize the lifetime of the multihop path. To make the lifetime of each node the same, we apply the flocking algorithm which imitates the behavior of a bird flock flying at the same velocity, so that the lifetime of the nodes is averaged locally. Simulation results show that the proposed algorithm can maximize the lifetime of the multihop path by making all nodes have the same lifetime.

키워드

Wireless-powered communication, Energy harvesting, Multihop transmission, Cooperation

1. 서 론

무선 이동 단말은 배터리를 통해 구동되므로 에너지 소비를 줄여 생존시간을 증대시키는 것이 매우 중요하다. 최근 발전되고 있는 radio frequency (RF) 기반의 무선 전력 전송 기술은 무선 네트워크 환경에서 정보와 전력을 동시에 전송하는 simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) 개념을 제시하였다 [1]. SWIPT는 RF 신호를 이용하여 송수신기 간에 전력 전송과 정보 전송을 동시에 수행하는 개념으로, 두 전송을 시간에 따라 나누어 사용하는 시분할(time switching) 기법과 수신한 RF 신호에서 전력의 일부는 에너지를 수신하는데 사용하고 나머지는 정보 디코딩에 이용하는 전력 분할(power splitting) 기법이 있다 [2], [3].

지금까지 SWIPT는 주로 1-홉 또는 2-홉 네트워크에 적용되었다 [1]-[3]. 하지만 3-홉 이상의 멀티홉

환경에서는 거의 연구되지 않았다. 미래 IoT 환경에서는 단말들이 멀티홉으로 연결되어 서로 상호작용을 하면서 네트워크의 응용 서비스를 제공하기 때문에 멀티홉 환경에서의 에너지 효율적인 전력공급 및 데이터 전송 기법이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 멀티홉 토폴로지에서 노드간 협력을 이용한 무선 전력공급 기반 멀티홉 전송 방식을 제안한다. 협력적 멀티홉 전송 시스템을 수학적으로 모델링 하고, 경로의 생존시간을 최대화하는 멀티홉 통신 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 각 노드의 생존시간을 동일하게 만들기 위하여 새 떼가 동일 속도로 날아다니는 행동양식을 모방한 flocking 알고리즘을 적용하여 노드의 생존시간을 지역적으로 분산 평균화 시킨다. 모의실험을 통하여 제안 알고리즘이 각 노드의 생존시간을 모두 동일하게 만들어 전체 경로의 생존시간을 최대화할 수 있음을 보여준다.

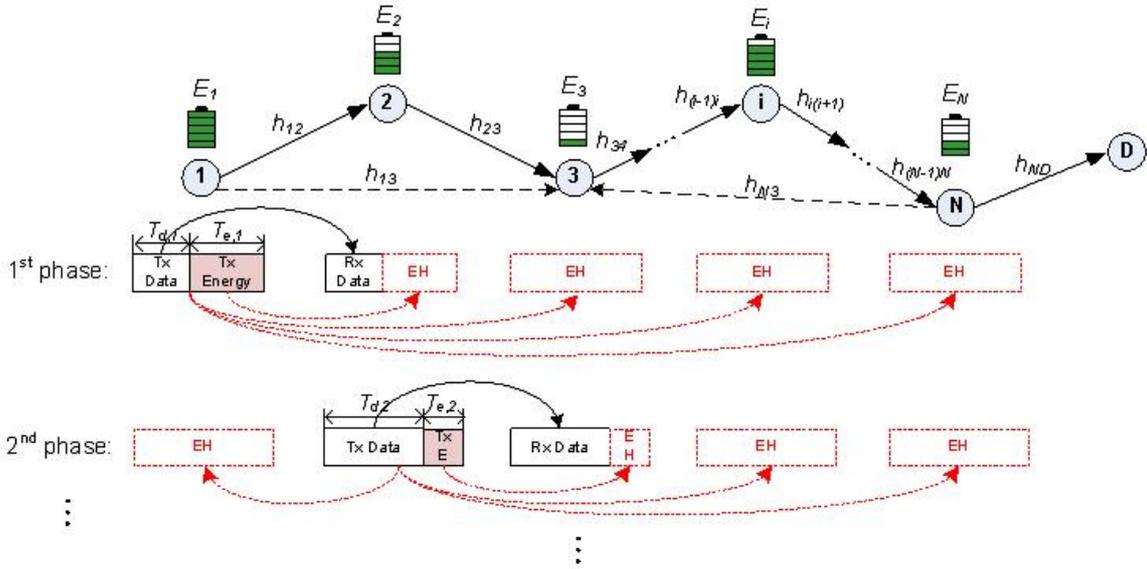


그림 1. 무선 전력공급 기반 협력적 멀티홉 전송 시스템

II. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 무선 전력공급 기반 협력적 멀티홉 전송 시스템을 보여준다. 첫 번째 노드에서 발생한 데이터는 각 홉에서 패킷을 다 수신한 후 이를 다음 홉으로 전달한다. 이때 노드 i 가 갖는 전송률은 다음과 같이 계산된다.

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

여기에서 W 는 사용하는 채널의 대역폭, P_{tx} 는 모든 노드에서 고정으로 사용하는 송신 전력의 세기, $h_{i(i+1)}$ 는 노드 i 에서 노드 $i+1$ 로의 채널, σ^2 은 잡음 전력을 나타낸다. 전송해야 할 패킷의 고정 비트 크기가 S_{pkt} 으로 주어지면 노드 i 가 패킷의 전송에 소요되는 시간은 다음과 같다.

$$T_{d,i} = \frac{S_{pkt}}{R_i} \quad (2)$$

노드 i 가 이 $T_{d,i}$ 시간 동안 패킷을 전송하는데 소모되는 총 에너지량은 다음과 같다.

$$\epsilon_{d,i} = P_{tx} T_{d,i} \quad (3)$$

멀티홉 경로의 생존시간은 생존시간이 제일 짧은 노드에 의해 제한되므로, 경로의 생존시간을 늘리기 위해서는 에너지 잔량이 많은 노드들이 적은 노드들에게 추가적으로 에너지를 공급해줄 필요가 있다. 따라서 각 노드는 데이터의 전송 후에 남은 에너지가 존재하면 이를 추가적으로 전송해준다. 한 노드의 남은 에너지는 에너지 잔량이 적은 노드들의 충전에 활용되어 해당 노드의 생존시간을 늘려줄 수 있다. 우리는 여기에서 경로 생존시간을 최대화하기 위한 각 노드의 에너지 전송 시간을 결정하고자 한다. 먼저 에너지 전송에 소비되는 에

너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{e,i} = P_{tx} T_{e,i} \quad (4)$$

여기에서 $T_{e,i}$ 는 i 번째 노드가 사용하는 에너지 전송 시간을 나타낸다. 따라서 기존 데이터 패킷 송신으로부터 얻는 에너지 하베스팅량에 추가적인 에너지 하베스팅량을 더하여 각 전송 패킷마다 노드 i 에서 하베스팅하는 에너지량은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{h,i} = \eta P_{tx} |h_{(i-1)i}|^2 T_{e,(i-1)} + \eta \sum_{n=1, n \neq i-1}^N P_{tx} |h_{ni}|^2 (T_{d,n} + T_{e,n}) \quad (5)$$

따라서 노드 i 가 갖는 에너지 변화량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta \epsilon_i = -\epsilon_{d,i} - \epsilon_{e,i} + \epsilon_{h,i} \quad (6)$$

각 노드 i 의 에너지 잔량이 E_i 로 주어질 때 생존시간은 다음과 같이 주어진다.

$$L_i = \frac{E_i}{-\Delta \epsilon_i} \quad (7)$$

경로 생존시간은 모든 노드가 살아있어 멀티홉 전송이 가능할 때까지의 시간으로 생존시간이 가장 짧은 노드에 의해 제한되어 다음과 같이 정의된다 [4].

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

III. 제안 알고리즘

멀티홉 전송에서 만약 노드 i 가 에너지 전송 시간($T_{e,i}$)을 증가시킨다면 노드 i 자신의 에너지 잔량(E_i)은 감소하지만 에너지를 줌으로써 나머지 다른 노드들의 에너지 잔량은 증가하게 된다. 즉, 노

드 i 가 자신의 생존시간을 희생하게 되면 다른 노드들은 생존시간이 증가하게 된다. 즉, 노드의 생존시간 L_i 는 상호 트레이드오프 관계를 가지므로 모든 i, j 에 대해서 $L_i = L_j$ 를 만족하는 경우에 L_i 의 최소값이 최대화 된다 [5]. 따라서 우리는 해법으로 모든 노드의 생존시간을 동일하게 만들어주는 알고리즘을 제안한다.

모든 노드의 생존시간을 동일하게 만들어 주기 위하여 새 군집이 떼를 지어 나는 원리인 flocking 알고리즘을 적용한다 [6]. Flocking 알고리즘은 집단의 각 개체가 자신의 속도를 주변의 인지 가능한 이웃들의 속도의 평균값에 맞추는 방식으로 전체 새 집단의 속도를 동일하게 만든다. 제안 알고리즘은 flocking 알고리즘을 기반으로 새의 속도 대신 각 노드의 생존시간을 동일하게 만들어 준다. 즉, 다음 $k+1$ 번째에서의 노드 i 의 생존시간을 다음과 같이 주변 노드 j 의 생존시간의 평균으로 결정한다.

$$L_i(k+1) - L_i(k) = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \Psi(|x_j - x_i|)(L_j(k) - L_i(k)) \quad (9)$$

이는 다음과 같이 간단히 표현 가능하다.

$$L_i(k+1) = \frac{1}{\mu} \sum_{j \in \{i, \text{neighbors of } i\}} L_j(k) \quad (10)$$

여기에서 μ 는 노드 i 와 i 의 주변 노드들을 합한 총 노드 개수를 나타낸다. 즉, 다음번 노드 i 의 생존시간은 자신과 인지 가능한 주변 노드들의 생존시간의 평균으로 결정된다.

식 (10)에 의해서 결정된 다음번 생존시간 $L_i(k+1)$ 을 달성하기 위한 노드 i 의 에너지의 전송 시간($T_{e,i}$)은 식 (6)과 (7)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$L_i(k+1) = \frac{E_i(k)}{\epsilon_{d,i}(k) + \tilde{\epsilon}_{e,i}(k) - \epsilon_{h,i}(k)} \quad (11)$$

$$\tilde{\epsilon}_{e,i}(k) \equiv \frac{E_i(k)}{L_i(k+1)} - \epsilon_{d,i}(k) + \epsilon_{h,i}(k) \quad (12)$$

여기에 식 (3)과 (4)를 적용하면 최종적으로 노드 i 의 다음번 에너지 전송 시간은 다음과 같이 결정된다.

$$T_{e,i}(k+1) = \max \left\{ 0, \frac{1}{P_{tx}} \left(\frac{E_i(k)}{L_i(k+1)} + \epsilon_{h,i}(k) \right) - T_{d,i} \right\} \quad (13)$$

이렇게 결정되는 각 노드의 에너지 전송 시간은 수렴 후에 모든 노드의 생존시간을 동일하게 만들어준다.

IV. 모의실험 결과

성능 평가를 위하여 N 개의 송신 노드가 존재하는 선형 멀티홉 토폴로지에서 표 1의 시스템 파라

미터를 고려하였다. 또한 이상적인 환경을 가정하여 모든 노드는 주변 모든 노드의 생존시간 정보를 획득할 수 있다고 가정하였다 [7].

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

| Parameter | Value |
|---|--------------------------------|
| Initial residual energy ($E_i(0)$) | Uni[1, 10] Joule |
| Distance between nodes ($d_{i(i+1)}$) | Uni[0.5, 1.0] m |
| Channel power gain ($ h_{i(i+1)} ^2$) | $G\rho^2 d_{i(i+1)}^{-\alpha}$ |
| Average pw. attenuation at 1 m (G) | -30 dB |
| Channel fading (ρ^2) | $\rho^2 \sim \text{Exp}(1)$ |
| Path loss exponent (α) | 2 |
| Transmit power (P_{tx}) | 23 dBm |
| Channel bandwidth (W) | 100 KHz |
| Noise spectral density | -160 dBm/Hz |
| Noise figure | 9 dB |
| Energy harvesting efficiency (η) | 1 |
| Transmitted packet size (S_{pkt}) | 100 kbits |

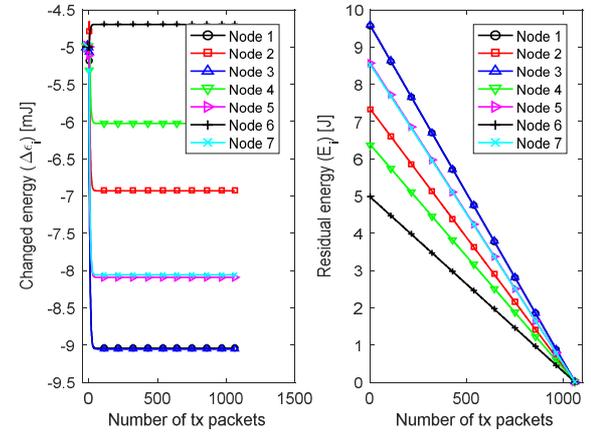


그림 2. 전송 패킷 수에 따른 에너지 변화량과 에너지 잔량

그림 2는 전송 홉 수가 7일 때 각 방식에서 전송하는 패킷 수에 따른 에너지 변화량(ΔE_i) 및 잔량(E_i)을 보여준다. 즉, 시간의 흐름에 따라 각 전송 노드별 변화하는 에너지 량 및 잔량을 보여주고 있다. 제안하는 무선 전력공급 기반 협력적 멀티홉 전송에서는 시간이 흐름에 따라 초기 에너지 변화량이 조정되어 특정 값으로 수렴된다. 즉, 초기 에너지 잔량이 적은 노드 6번의 경우에 에너지 변화량이 가장 적게 되며, 초기 에너지 잔량이 가장 많은 노드 3번의 경우 다른 노드들을 돕기 위하여 자신의 에너지를 더 소모하기 때문에 에너지 변화량이 가장 크게 된다. 이와 같은 노드간 협력에 의해 노드별 에너지 잔량의 기울기는 서로 다르게 되며, 시간이 흐름에 따라 각 노드의 에너지

잔량은 동시에 0이 되어 경로의 생존시간이 최대화가 됨을 알 수 있다.

생존시간을 극대화시키는데 유용하게 적용 가능하다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future (No. 2016R1C1B1016261).

References

- [1] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT), pp. 1612-1616, Jul. 2008.
- [2] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 61, No. 11, pp. 4754-4767, 2013.
- [3] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 12, No. 7, pp. 3622-3636, 2013.
- [4] H.-H. Choi, H.-G. Lee, and J.-R. Lee, "A new energy-aware source routing protocol for maximization of network lifetime in MANET," *IEICE Trans. on Information and Systems*, E97-D(2), pp. 335-339, 2014.
- [5] H.-H. Choi and J.-R. Lee, "Distributed transmit power control for maximizing end-to-end throughput in wireless multi-hop networks," *Wireless Personal Communications*, Vol. 74, No. 3, pp. 1033-1044, 2014.
- [6] H.-H. Choi and J.-R. Lee, "Principles, applications, and challenges of synchronization in nature for future mobile communication systems," *Hindawi Mobile Information Systems*, 2017, pp. 1-13, 2017.
- [7] H.-H. Choi and J.-R. Lee, "A flocking-inspired algorithm for fair resource allocation in vehicle-mounted mobile relays," *Journal of Network and Computer Applications*, 85, pp. 134-142, 2017.

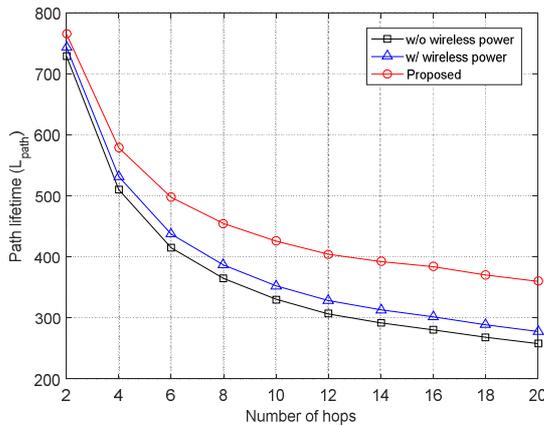


그림 3. 전송 홉 수에 따른 경로 생존시간

그림 3은 전송 홉 수에 따른 경로 생존시간을 보여준다. 제안 방식과의 비교를 위한 기존 방안으로 무선 전력공급이 없는 멀티홉 전송 방식(w/o wireless power)과 노드간 협력 없이 기본적인 무선 전력공급을 수행하는 멀티홉 전송 방식(w/ wireless power)을 상정하여 비교하였다. 전송 홉 수가 증가함에 따라 모든 방식의 생존시간은 감소하게 된다. 이는 참여 노드 수가 많아질수록 링크의 채널 값이나 노드의 초기 배터리 잔량의 분산이 커져 생존시간을 결정하는 worst 노드의 기본 성능이 더 나빠기 때문이다. 무선 전력공급을 하지 않는 경우와 비교하여 무선 전력공급을 하는 경우 경로 생존시간이 약간 증가함을 볼 수 있다. 반면 협력적인 무선 전력공급을 하는 제안 방식의 경우 다른 두 방식에 비해 경로 생존시간이 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 노드간 협력을 통하여 채널이 좋고 배터리 잔량이 많은 노드가 그렇지 않은 노드들에게 추가적으로 전력을 공급하여 모든 노드가 동시에 에너지가 고갈되도록 만들기 때문이다.

V. 결론

본 연구에서는 무선 전력 전송 기술을 이용한 협력적 멀티홉 전송 방식을 제안하였다. 제안 알고리즘은 멀티홉 경로의 생존시간의 최대화를 목적으로 상호 트레이드오프 성질을 갖는 멀티홉 구성 노드의 생존시간을 분산적으로 평균화 시킨다. 이를 통하여 각 노드의 생존시간을 모두 동일하게 만들어 주어 전체 경로의 생존시간을 최대화시킬 수 있었다. 제안한 분산 알고리즘은 반복 동작에 의한 수렴 시간을 필요로 하며 노드간 생존시간 정보를 공유해야 하는 오버헤드가 존재하지만, 멀티홉 토폴로지를 갖는 IoT 환경에서 네트워크의