

생존시간 증대를 위한 협력적 에너지 하베스팅 기반 무선 멀티홉 전송 방식

최 현 호*

Wireless Multihop Transmission Scheme Based on Cooperative Energy Harvesting for Lifetime Increase

Hyun-Ho Choi*

요 약

IoT 환경에서는 배터리로 구동되는 무선 단말들이 멀티홉으로 연결되어 서로 상호작용을 하면서 서비스를 제공하기 때문에 멀티홉 환경에서의 효과적인 에너지 하베스팅 및 전송 기법이 필요하다. 본 논문에서는 멀티홉 기반의 선형 네트워크 토폴로지에서 노드간 협력을 이용한 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 전송 방식을 제안한다. 에너지 하베스팅의 사용 유무와 노드간 협력 유무에 따라 멀티홉 전송 시스템을 수학적으로 모델링 하고, 협력적 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 통신 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 멀티홉 경로의 생존시간의 최대화를 목적으로 트레이드오프 관계를 갖는 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.

Key Words : Energy harvesting, multihop transmission, lifetime maximization, cooperation

ABSTRACT

In IoT environments, battery-powered wireless devices are connected to each other by multihop and provide services while interacting with each other so that effective energy harvesting and transmission schemes are needed in a multi-hop environments. In this paper, we propose an energy harvesting-based multihop transmission scheme using inter-node cooperation in multihop-based linear network topology. We propose a multihop communication protocol based on cooperative energy harvesting by mathematically modeling the multihop transmission system according to whether energy harvesting is used or not and whether there is cooperation between nodes. In order to maximize the lifetime of the multihop path, the proposed protocol determines the energy transfer time for each node to make the lifetime of the each node be equal, which has the tradeoff relationship each other. 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.

* 본 연구는 2016년도 환경대학교 교비(해외)과건 연구비의 지원에 의한 것임

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

논문번호 : 201808-261-B-RN, Received August 28, 2018; Revised October 5, 2018; Accepted October 13, 2018

I. 서 론

무선 이동 단말은 배터리를 통해 구동되므로 에너지 소비를 줄여 생존시간을 증대시키는 것이 매우 중요하다. 최근 발전되고 있는 radio frequency (RF) 기반의 무선 에너지 하베스팅(energy harvesting, EH) 기술은 전원의 연결이나 배터리의 교체 없이 소형 센서 노드의 수명을 크게 늘릴 수 있는 방법으로 각광을 받고 있다. 기존의 에너지 하베스팅 기술은 태양광, 풍력, 진동 등의 여러 주변 환경으로부터 전력을 공급 받았지만, 이러한 환경 조건을 이용하기 힘든 무선 네트워크를 위하여 simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) 개념이 제시되었다¹⁾. SWIPT는 RF 신호를 이용하여 송수신기 간에 에너지 하베스팅과 정보 전송을 동시에 수행하는 개념으로, 에너지 하베스팅과 정보의 디코딩을 시간에 따라 나누어 사용하는 시분할(time switching) 기법과 수신한 RF 신호에서 전력의 일부는 에너지 하베스팅을 하는데 사용하고 나머지는 정보 디코딩에 이용하는 전력 분할(power splitting) 기법이 사용된다^{2,3)}.

지금까지 SWIPT는 주로 1-홉 또는 2-홉 네트워크에 적용되었다. 1-홉 무선 네트워크에서는 에너지 효율 및 전송 속도를 높이기 위한 목적으로 정보 디코딩과 에너지 하베스팅 간의 트레이드오프(tradeoff)를 고려하여 다양한 전송 프로토콜을 설계하고 최적화를 수행하였다⁴⁻¹⁰⁾. 점대점 토폴로지의 단일 안테나 시스템(Single Input Single Output, SISO)^{4,5)}에서 시작하여 다중 안테나 시스템(Multiple Input Multiple Output, MIMO)^{6,7)}으로 확장되었다. 수신자 수에 따라 단일 사용자와 다중 사용자로 나뉘어 연구가 수행되었고, 다수의 수신기가 하나의 공통 송신기로부터 정보 및 에너지를 수신하는 방송 및 멀티캐스트 구조로 확장되었다⁸⁻¹⁰⁾. 또한 SWIPT는 소스 노드에서 전송된 데이터를 중계 노드의 도움을 받아 목적지로 전달하는 2-홉 협력 네트워크에 적용되었다¹¹⁻¹³⁾. 중계 노드는 소스로부터 정보를 수신하면서 동시에 에너지를 하베스팅 한 후 하베스팅한 에너지를 이용하여 정보 또는 에너지를 목적지로 전달한다. Amplify-and-forward (AF) 기반의 중계기를 고려하여 중단 간 아웃리지 확률을 최소화하기 위한 정보 전송과 에너지 하베스팅 사이의 전력 분할 비를 구하였다¹¹⁾. 중계기가 하나만 존재하는 환경¹²⁾과 여러 개의 중계기를 공유하는 환경¹³⁾에서 중계기에서의 정보와 에너지 사이의 자원 할당 문제를 다루었다.

최근 SWIPT를 멀티홉 무선 네트워크에 적용하기

시작하여 에너지 하베스팅을 하지 않을 때 대비 하베스팅을 하는 경우 노드의 에너지 잔량이 증가하고 노드간의 잔여 에너지가 균형을 이룬다는 것을 보여주었다¹⁴⁾. 또한, 에너지가 제약된 멀티홉 네트워크 환경에서 SWIPT를 사용할 때 네트워크의 에너지 소비를 줄이고 생존시간을 증대하기 위한 에너지 인지 기반 라우팅 프로토콜을 제안하였다¹⁵⁾. 하지만 기존 SWIPT 기반의 에너지 하베스팅 및 전송 기법은 대부분 2-홉 이하의 네트워크에서 연구되었으며 3-홉 이상의 멀티홉 환경에서의 연구는 거의 되어 있지 않다. 미래 IoT 환경에서는 단말들이 멀티홉으로 연결되어 서로 상호작용을 하면서 네트워크의 응용 서비스를 제공하기 때문에 멀티홉 환경에서의 에너지 효율적인 하베스팅 및 전송 기법이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 멀티홉 기반의 선형 네트워크 토폴로지에서 노드간 협력을 이용한 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 전송 방식을 제안한다. 에너지 하베스팅의 사용 유무와 노드간 협력 유무에 따라 멀티홉 전송 시스템을 수학적으로 모델링 하고, 협력적 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 통신 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 멀티홉 경로의 생존시간의 최대화를 목적으로 트레이드오프 관계를 갖는 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.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 에너지 하베스팅과 노드간 협력의 사용 유무에 따라 멀티홉 전송 방식의 시스템 모델을 제시한다. III장에서는 경로 생존시간의 최대화를 목적으로 제안하는 협력적 에너지 하베스팅 알고리즘을 제안한다. IV장에서 에너지 하베스팅과 협력 유무에 따라 멀티홉 전송 방식들의 성능을 보여주고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

에너지 하베스팅과 노드간 협력의 유무에 따른 멀티홉 전송 시스템의 모델을 제시한다. 고려하는 시스템에서 모든 노드는 다른 외부 소스로부터 에너지를 공급받지 않고 배터리 파워로 구동된다. 또한 현실적

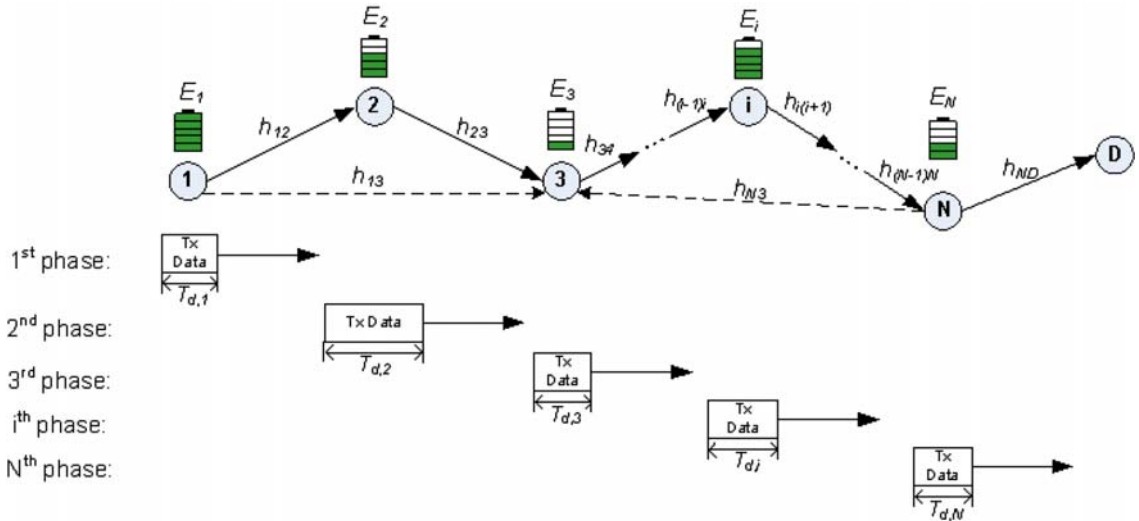


그림 1. 에너지 하베스팅이 없는 멀티홉 전송의 시스템 모델
Fig. 1. System model for multihop transmission without energy harvesting

인 상황을 고려하여 각 노드의 초기 에너지 잔량은 랜덤하게 주어진다. 소스 노드는 발생한 일정 크기의 패킷 데이터를 중간 노드들을 경유하여 멀티홉으로 목적지 노드에게 전송하며, 중간 노드는 decode-and-forward (DF) 방식으로 동작하며 채널 에러는 없다고 가정한다. 여기에서는 에너지 하베스팅을 사용하지 않는 기존의 멀티홉 전송, 기본적인 에너지 하베스팅을 추가한 멀티홉 전송, 노드간 협력적인 에너지 하베스팅을 수행하는 멀티홉 전송으로 나누어 세 종류의 멀티홉 전송 시스템을 고려한다.

2.1 에너지 하베스팅이 없는 멀티홉 전송

그림 1은 에너지 하베스팅이 없는 기존의 멀티홉 전송 과정을 보여준다. 첫 번째 노드에서 발생한 데이터가 여러 중간 노드들을 거쳐 최종 목적지에 도착한다. 각 노드는 이전 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 파워의 세기, $h_{i(i+1)}$ 는 노드 i 에서 노드 $i+1$ 로의 채널, σ^2 은 노이즈 파워를 나타낸다. 전송해야 할 패킷의 고정 비트 크기가 S_{pkt} 으로 주어지면 노드 i 가 패킷의 전송에 소요되

는 시간은 다음과 같이 계산된다.

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

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

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

노드 i 에게 주어진 초기 에너지 잔량이 E_i 라면 노드 i 의 생존시간은 다음과 같이 계산된다.

$$L_i = \frac{E_i}{\epsilon_{d,i}} \quad (4)$$

전체 멀티홉 경로의 생존시간은 모든 노드가 살아있어 멀티홉 전송이 가능할 때까지의 시간으로 정의된다^[16]. 따라서 경로의 생존시간은 생존시간이 가장 짧은 노드에 의해 제한되어 다음과 같이 표현 가능하다.

$$L_{path} = \min\{L_i\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

2.2 에너지 하베스팅을 수행하는 멀티홉 전송

그림 2는 기본적인 에너지 하베스팅을 수행하는 멀티홉 전송 과정을 보여준다. 이 경우 데이터의 송수신

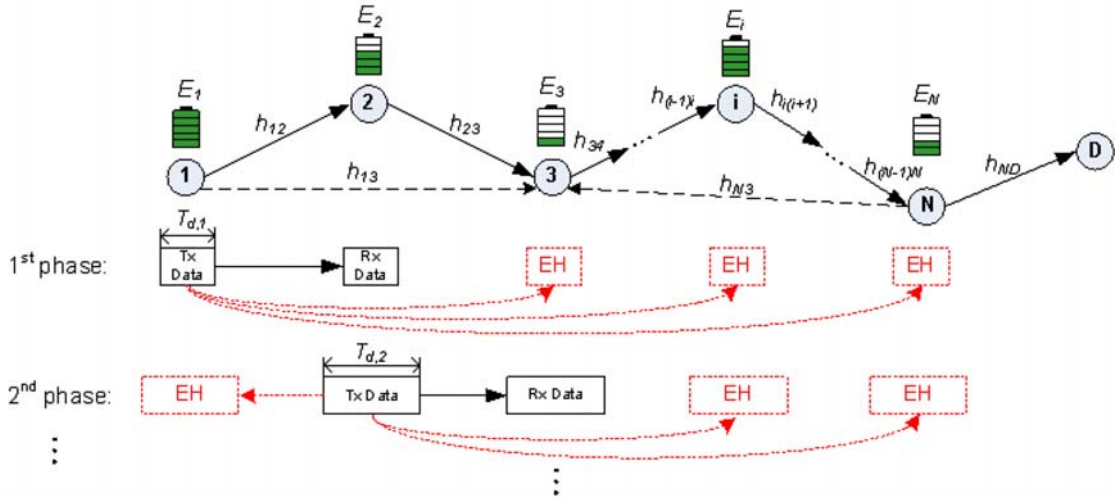


그림 2. 에너지 하베스팅을 수행하는 멀티홉 전송의 시스템 모델
 Fig. 2. System model for multihop transmission with energy harvesting

에 참여하지 않는 노드들은 송신 노드로부터 방사되는 RF 신호를 수신하여 에너지를 하베스팅 함으로써 추가적인 배터리의 충전이 가능하다. 예를 들어 1번 노드가 2번 노드에게 패킷을 전송할 때 나머지 3번에서 N번 노드까지는 1번 노드의 신호로부터 에너지 하베스팅을 수행한다. 또한 2번 노드가 패킷을 전송할 때에는 송수신에 참여하지 않는 나머지 1번과 4번에서 N번 노드까지 에너지 하베스팅을 하게 된다.

한 패킷이 소스에서 목적지까지 전달될 때 임의의 노드 i 가 하베스팅하는 에너지의 총량은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{h,i} = \eta \sum_{n=1, n \neq i-1, i}^N P_{tx} |h_{\ni}|^2 T_{d,n} \quad (6)$$

여기에서 η 는 에너지 하베스팅 효율로 0과 1 사이의 값을 갖는다. 노드 i 가 패킷 전송에 소모되는 에너지량은 식 (3)으로 주어지므로 에너지 소모 및 하베스팅을 고려할 때 변경되는 에너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \epsilon_i = -\epsilon_{d,i} + \epsilon_{h,i} (\because \epsilon_{d,i} > \epsilon_{h,i} > 0) \quad (7)$$

따라서 각 노드 i 의 생존시간은 다음과 같이 주어진다.

$$L_i = \frac{E_i}{-\Delta \epsilon_i} \quad (8)$$

에너지 하베스팅을 하지 않을 때의 생존시간인 식 (4)와 비교하면 $-\Delta \epsilon_i < \epsilon_{d,i}$ 이므로 에너지 하베스팅으로 인하여 노드 i 의 생존시간이 증가하게 된다. 증가된 노드 생존시간을 식 (5)에 대입하여 경로 생존시간을 구할 수 있다.

2.3 협력적 에너지 하베스팅을 수행하는 멀티홉 전송

그림 3은 제안하는 협력적 에너지 하베스팅을 이용하는 멀티홉 전송 방식의 시스템 모델을 보여준다. 기본적으로 SWIPT의 시분할 기법을 기반으로 하여 각 노드는 데이터의 전송 후에 남은 에너지가 존재하면 이를 추가적으로 전송한다. 한 노드의 남은 에너지는 에너지 잔량이 적은 노드들의 충전에 활용되어 해당 노드의 생존시간을 늘려줄 수 있다. 멀티홉 경로의 생존시간은 생존시간이 제일 짧은 노드에 의해 제한되므로, 경로의 생존시간을 늘리기 위해서는 에너지 잔량이 많은 노드들이 적은 노드들에게 추가적으로 에너지를 공급해줄 필요가 있다. 이와 같은 개념을 바탕으로 멀티홉 경로의 생존시간을 최대화하기 위한 각 노드의 에너지 전송 시간을 결정한다.

먼저 에너지 전송에 소비되는 에너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{e,i} = P_{tx} T_{e,i} \quad (9)$$

여기에서 $T_{e,i}$ 는 i 번째 노드가 사용하는 에너지 전송 시간을 나타낸다. 따라서 기존 데이터 패킷 송신은

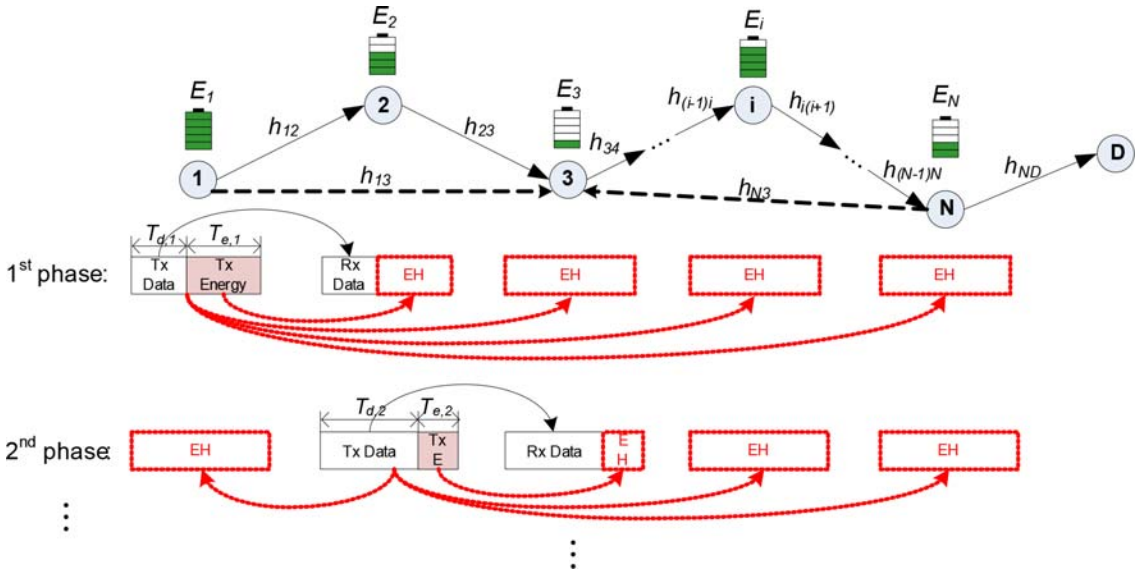


그림 3. 협력적 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 전송의 시스템 모델
 Fig. 3. System model for multihop transmission based on cooperative energy harvesting

로부터 얻는 에너지 하베스팅 량에 추가적인 에너지 하베스팅 량을 더하여 각 전송 패킷마다 노드 i 에서 하베스팅하는 에너지 량은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{h,i} = \eta P_{tx} |h_{(i-1)i}|^2 T_{e,(i-1)} + \eta \sum_{n=1, n \neq i-1, i}^N P_{tx} |h_{ni}|^2 (T_{d,n} + T_{e,n}) \quad (10)$$

위 식에서 보듯이 노드 i 는 이전 노드 $i-1$ 로부터 데이터 수신 후에 추가적인 $T_{e,(i-1)}$ 시간 동안 에너지를 공급받게 된다. 식 (3), (9), (10)으로부터 노드 i 가 갖는 에너지 변화량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta \epsilon_i = -\epsilon_{d,i} - \epsilon_{e,i} + \epsilon_{h,i} \quad (11)$$

각 노드의 생존시간 L_i 와 경로 생존시간 L_{path} 는 식 (11)을 식 (8)과 (5)에 반영함으로써 결정된다.

III. 제안 알고리즘

멀티홉 링크는 서로 다른 채널을 갖고 있으므로 서로 다른 데이터 전송 시간($T_{d,i}$)을 갖는다. 또한 각 노드에게 주어진 에너지 잔량(E_i)도 현실적으로 서로 다른 값을 갖는다. 이렇게 각 노드마다 차별적으로 주어지는 환경 파라미터로 인하여 멀티홉을 구성하는 각

노드의 생존시간(L_i)은 서로 다르다. 그런데 서로 연결된 멀티홉 토폴로지는 첫 노드의 배터리 소진에 의해 경로의 생존시간이 결정되므로 에너지가 다 소모된 노드가 발생하면 다른 노드들의 에너지 잔량이 존재하더라도 멀티홉 경로는 단절되어 더 이상 목적지까지 패킷을 전달할 수 없다^[16].

II장에서 제시한 협력적 에너지 하베스팅 기반의 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, 노드 i 가 자신의 생존시간을 희생하게 되면 다른 노드들은 생존시간이 증가하게 된다. 이와 같이 노드의 생존시간은 상호 트레이드오프 관계를 갖는다.

이와 같은 상황에서 제안 알고리즘의 목적은 경로 생존시간을 최대화하는 것으로 다음과 같은 최적화 문제로 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{T_e} L_{path} &= \max_{T_e} \min \{L_i\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \\ \text{s.t.} \quad T_e &= [T_{e,1}, T_{e,2}, \dots, T_{e,N}] \end{aligned} \quad (12)$$

노드의 생존시간 L_i 는 상호 트레이드오프 관계를 가지므로(즉, 한 L_i 가 증가하면 다른 나머지 $L_j, \forall j \neq i$ 는 감소하고, 한 L_i 가 감소하면 다른 나머지 $L_j, \forall j \neq i$ 는 증가함) 모든 i, j 에 대해서 $L_i = L_j$

표 1. 제안 알고리즘의 pseudo-code
Table 1. Pseudo-code of proposed algorithm

<p>Ensure: S_{pkt} = packet size to be transmitted R_i = transmission rate of node i (given by Eq. (1)) $T_{d,i}$ = data transmission time of node i (given by Eq. (2)) $\epsilon_{d,i}$ = energy consumed for data transmission of node i (given by Eq. (3)) $\epsilon_{h,i}$ = energy consumed for data transmission of node i (given by Eq. (6))</p> <p>01: Initialize: $T_{e,i}(0) = 0$ // initial energy transmission time of node i $\epsilon_{e,i}(0) = 0$ // initial energy consumed for energy transmission of node i $E_i(0) = \text{Uniform}[\text{MIN}, \text{MAX}]$ // initial residual energy of node i $L_i(0) = E_i(0) / (\epsilon_{d,i} + \epsilon_{h,i})$ // initial lifetime of node i</p> <p>02: while (true) // for each node i in a distributed manner 03: Transmit data during $T_{d,i}$ and transmits energy during $T_{e,i}(k)$ 04: Harvest energy $\epsilon_{h,i}(k)$ during the remaining time 05: Sharing information of $L_i(k)$ among nodes 06: Update $L_i(k+1) \leftarrow \frac{1}{\mu} \sum_{j \in \{i, \text{neighbors of } i\}} L_j(k)$ // local average of $L_i(k)$ 07: Estimate $\tilde{\epsilon}_{e,i}(k+1)$ from Eq. (17) // next energy consumed for energy tx. of node i 08: Determine the next energy transmission time $T_{e,i}(k+1)$ from Eq. (18) 09: if $T_{e,i}(k+1) - T_{e,i}(k) < \epsilon$ then // if there is little change in $T_{e,i}$ where ϵ is a sufficiently small value 10: break; // Converged 11: end if 12: end while 13: Node i transmits data during $T_{d,i}$ and transmits energy during the converged $T_{e,i}$</p>

를 만족하는 경우에 L_i 의 최소값이 최대화가 된다^[17]. 따라서 우리는 식 (12)의 최적화 문제의 해법으로 모든 노드의 생존시간을 동일하게 만들어주는 알고리즘을 제안한다.

모든 노드의 생존시간을 동일하게 만들어 주기 위하여 새 군집이 떼를 지어 나는 원리인 flocking 알고리즘을 적용한다[18]. Flocking 알고리즘은 분산 환경에서 각 개체가 갖는 값을 동일하게 맞추는데 효과적으로 사용된다. 예를 들면 분산 네트워크에서의 송신 전력 제어^{[19],[20]}, 자원 관리^[21], 망 구성 및 제어^[22], 센서 노드 배치^[23] 등의 문제에 적용되었다. Flocking에서 집단 속의 각 개체는 자신의 속도를 주변의 인지가 가능한 이웃 새들의 속도의 평균값에 맞추는 방식으로 동작하여 모든 개체의 속도를 동일하게 만든다. 이를 모델링한 flocking 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

$$v_i(t+1) - v_i(t) = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \Psi(|x_j - x_i|)(v_j(t) - v_i(t)) \quad (13)$$

여기에서 x_i 는 i 번째 새의 위치, v_i 는 i 번째 새의 속도, N 은 전체 새의 개수, λ 는 0과 1사이의 상수로 설정되는 결합 강도, Ψ 는 두 새들 간의 거리를 입력으로 받아 0 또는 1을 반환하는 거리 함수를 나타낸다. 두 새 사이의 거리가 일정 거리(θ)보다 작다면(즉, $|x_j - x_i| \leq \theta$ 이면) $\Psi = 1$ 이 되고 그렇지 않으면(즉, $|x_j - x_i| > \theta$ 이면) $\Psi = 0$ 이 된다. 즉, $t+1$ 시간에서의 새 i 의 속도는 시간 t 에서의 주변 새들과의 속도 차이의 평균값에 의하여 갱신된다.

제안 알고리즘은 flocking 알고리즘을 기반으로 새의 속도 대신 각 노드의 생존시간을 동일하게 만들어 준다. 식 (13)을 변형하여 다음 $k+1$ 번째에서의 노드 i 의 생존시간을 다음과 같이 주변 노드 j 의 생존시간의 평균으로 결정한다.

$$L_i(k+1) - L_i(k) = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \Psi(|x_j - x_i|)(L_j(k) - L_i(k)) \quad (14)$$

이는 다음과 같이 간단히 표현 가능하다.

$$L_i(k+1) = \frac{1}{\mu} \sum_{j \in \{i, \text{neighbors of } i\}} L_j(k) \quad (15)$$

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 (15)에 의해서 결정된 다음번 생존시간 $L_i(k+1)$ 을 달성하기 위한 노드 i 의 에너지의 전송 시간($T_{e,i}$)은 식 (8)과 (11)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$L_i(k+1) = \frac{E_i(k)}{\epsilon_{d,i}(k) + \tilde{\epsilon}_{e,i}(k+1) - \epsilon_{h,i}(k)} \quad (16)$$

$$\tilde{\epsilon}_{e,i}(k+1) \equiv \frac{E_i(k)}{L_i(k+1)} - \epsilon_{d,i}(k) + \epsilon_{h,i}(k) \quad (17)$$

여기에 식 (3)과 (9)를 적용하면 최종적으로 노드 i 의 다음번 에너지 전송 시간은 다음과 같이 결정된다.

$$T_{e,i}(k+1) = \max \left\{ 0, \frac{1}{P_{tx}} \left(\frac{E_i(k)}{L_i(k+1)} + \epsilon_{h,i}(k) \right) - T_{d,i} \right\} \quad (18)$$

이렇게 결정되는 각 노드의 에너지 전송 시간은 수렴 후에 모든 노드의 생존시간을 동일하게 만들어주어 멀티홉 경로의 생존시간을 최대화한다. 표 1은 제안 알고리즘의 pseudo-code를 보여준다.

IV. 모의실험 결과

제안하는 협력적 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 전송 방식(Cooperative EH)의 성능을 파악하기 위하여 기존 방안으로 에너지 하베스팅을 하지 않는 멀티홉 전송 방식(without EH)과 노드간 협력 없이 기본적인 에너지 하베스팅을 수행하는 멀티홉 전송 방식(with EH)을 상정하여 비교하였다. 성능 평가를 위하여 N개의 송신 노드가 존재하는 선형 멀티홉 토폴로지에서 표 2의 시스템 파라미터를 고려하였다. 각 노드의 초기 에너지 잔량은 1~10 Joule 사이에서 랜덤하게 주어지며, 각 노드간의 거리는 0.5~1 m 사이에서 랜덤하게 주어진다. 에너지 하베스팅 네트워크에서 일반

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Initial residual energy ($E_i(0)$)	Uniform[1, 10] Joule
Distance between nodes ($d_{i(i+1)}$)	Uniform[0.5, 1.0] m
Channel power gain ($ h_{i(i+1)} ^2$)	$G\rho^2 d_{i(i+1)}^{-\alpha}$
Average power attenuation at a reference distance of 1 m (G)	-30 dB
Channel fading (ρ^2)	$\rho^2 \sim \text{Exp}(1)$
Path loss exponent (α)	2 or 3
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

적으로 사용되는 거리 기반의 경로 감쇄와 페이딩 모델을 적용하여 채널 이득 값을 결정하였다. 에너지 하베스팅이 이상적으로 된다고 가정하여 에너지 하베스팅 효율을 1로 설정하였다²⁴⁾. 또한 이상적인 환경을 가정하여 모든 노드는 주변 모든 노드의 생존시간 정보를 획득할 수 있다고 가정하였다¹⁹⁾.

그럼 4는 전송 홉 수가 7일 때 각 방식에서 전송하는 패킷 수에 따른 에너지 변화량($\Delta\epsilon_i$) 및 잔량(E_i)을 보여준다. 즉, 시간의 흐름에 따라 각 전송 노드별 변화하는 에너지 량 및 잔량을 보여주고 있다. 에너지 하베스팅을 하지 않는 경우 매 패킷 전송 시마다 변화하는 에너지 량은 노드의 주어진 채널에 따라 결정되며 이는 항상 일정한 값을 갖는다. 이 에너지 변화량에 따라 각 노드의 에너지 잔량은 패킷 전송 시마다 일정량씩 감소하게 되며 한 노드라도 에너지가 모두 소진되어 에너지 잔량이 0이 될 때 멀티홉 경로가 단절된다. 이때까지 전송된 패킷의 개수가 경로 생존시간으로 매핑되며 (b)의 결과에서 보듯이 에너지 하베스팅을 하지 않는 경우 경로 생존시간은 924번의 패킷 전송시간이 된다. 이 경우 노드 6번이 초기 에너지 잔량이 가장 적은 노드로 이 노드의 에너지 소진에 의해 경로 생존시간이 결정된다.

기본적인 에너지 하베스팅을 사용하는 경우에 에너지 변화량은 에너지 하베스팅을 하지 않는 경우와 비교하여 더 작은 값을 갖는다. 즉, 주변 노드로부터 에

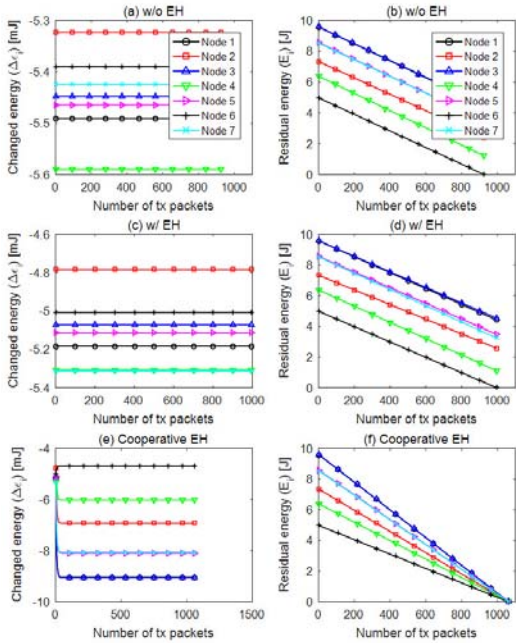


그림 4. 전송 패킷 수에 따른 에너지 변화량과 에너지 잔량. (a,b) 에너지 하베스팅이 없을 때, (c,d) 기본적인 에너지 하베스팅을 사용할 때, (e,f) 제안하는 협력적 에너지 하베스팅을 사용할 때
 Fig. 4. Changed energy and residual energy vs. number of transmitted packets: (a,b) without EH, (c,d) with EH, and (e,f) cooperative EH

너지를 충전 받기 때문에 매 전송 시마다 소모되는 에너지 량이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 이 경우에도 노드별 채널에 따라 소비되는 에너지 량과 충전되는 에너지 량이 모두 고정으로 결정되므로 에너지 변화량도 시간에 따라 일정하다. 이 에너지 변화량이 반영되어 에너지 잔량의 변화는 마찬가지로 일정하게 감소됨을 볼 수 있다. 즉, 가장 에너지 잔량이 적은 노드 6번이 가장 먼저 에너지를 다 소진하여 경로 생존시간을 결정한다. 이 경우 생존시간은 995번의 패킷 전송시간이 되며 에너지 하베스팅을 하지 않은 경우 대비 경로 생존시간이 증가함을 알 수 있다.

제안하는 협력적 에너지 하베스팅을 하는 경우 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 에너

지 잔량은 동시에 0이 되어 경로의 생존시간이 최대화가 됨을 알 수 있다. 이 경우 경로의 생존시간은 1061번의 패킷 전송시간으로 주어져 다른 두 방식에 비하여 경로 생존시간이 증가함을 볼 수 있다.

그림 5와 6은 각각 path loss exponent(α) 값이 2와 3일 때 전송 홉 수에 따른 경로 생존시간을 보여준다. 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 나쁘기 때문이다. 에너지 하베스팅을 하지 않는 경우와 비교하여 에너지 하베스팅을 하는 경우 경로 생존시간이 약간 증가함을 볼 수 있다. 반면 협력적인 에너지 하베스팅을 하는 경우 다른 두 방식에 비해 경로 생존시간이 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 노드간 협력을 통하여 채널이 좋고 배터리 잔량이 많은 노

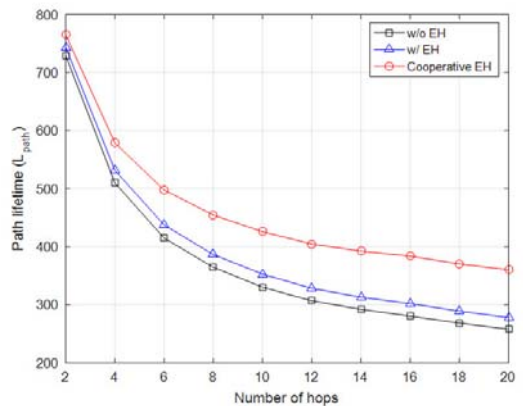


그림 5. 전송 홉 수에 따른 경로 생존시간 ($\alpha=2$ 일 때)
 Fig. 5. Path lifetime vs. number of hops when $\alpha=2$

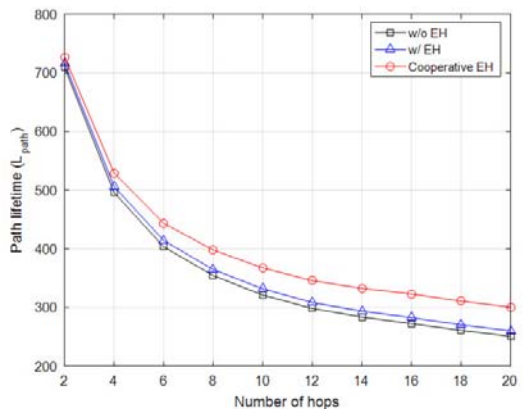


그림 6. 전송 홉 수에 따른 경로 생존시간 ($\alpha=3$ 일 때)
 Fig. 6. Path lifetime vs. number of hops when $\alpha=3$

드가 그렇지 않은 노드들에게 추가적으로 에너지를 공급하여 모든 노드가 동시에 에너지가 고갈되도록 만들기 때문이다. $\alpha=3$ 으로 증가된 그림 6의 결과에서는 신호의 경로 감쇄가 심해져 에너지 하베스팅 량이 전체적으로 줄어들어 세 방식 모두 생존시간이 줄어든다. 제안하는 협력적 에너지 하베스팅 방식의 경우 경로 감쇄가 심할수록 추가적으로 얻는 에너지 하베스팅 량이 줄어들기 때문에 $\alpha=2$ 인 경우와 비교하여 성능 이득이 약간 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 무선 에너지 하베스팅 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 생존시간을 극대화시키는데 유용하게 적용 가능하다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 향후에는 실제 통신 환경에서 테스트베드를 구축하여 제안 방안의 성능을 검증하고 동작을 개선할 계획이다.

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, Nov. 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, Jul. 2013.
- [4] 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.
- [5] K. Huang and E. Larsson, "Simultaneous information and power transfer for broadband wireless systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 23, pp. 5972-5986, Dec. 2013.
- [6] Q. Shi, L. Liu, W. Xu, and R. Zhang, "Joint transmit beamforming and receive power splitting for MISO SWIPT systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 6, pp. 3269-3280, Jun. 2014.
- [7] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
- [8] Y. Dong, J. Hossain, and J. Cheng, "Joint power control and time switching for SWIPT systems with heterogeneous QoS requirements," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 328-331, Feb. 2016.
- [9] X. Zhou, J. Guo, S. Durrani, and I. Krikidis, "Performance of maximum ratio transmission in ad hoc networks with SWIPT," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 4, no. 5, pp. 529-532, Oct. 2015.
- [10] Z. Zong, H. Feng, F. R. Yu, N. Zhao, T. Yang, and B. Hu, "Optimal transceiver design for SWIPT in K-user MIMO interference channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 430-445, Jan. 2016.
- [11] L. Hu, C. Zhang, and Z. Ding, "Dynamic power splitting policies for AF relay networks with wireless energy harvesting," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshop (ICCW)*, pp. 2035-2039, Jun. 2015.
- [12] P. Liu, S. Gazor, I.-M. Kim, and D. I. Kim, "Energy harvesting noncoherent cooperative communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 12, pp. 6722-6737, Dec. 2015.
- [13] Z. Chu, M. Johnston, and S. L. Goff, "SWIPT

for wireless cooperative networks,” *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 6, pp. 536-538, Jun. 2015.

[14] S. Guo, Y. Shi, Y. Yang, and B. Xiao, “Energy efficiency maximization in mobile wireless energy harvesting sensor networks,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 17, no. 7, pp. 1524-1537, Jul. 2018.

[15] S. He, K. Xie, W. Chen, D. Zhang, and J. Wen, “Energy-aware routing for SWIPT in multi-hop energy-constrained wireless network,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 17996-18008, Mar. 2018.

[16] 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. Inf. and Syst.*, vol. E97-D, no. 2, pp. 335-339, Feb. 2014.

[17] H.-H. Choi and J.-R. Lee, “Distributed transmit power control for maximizing end-to-end throughput in wireless multi-hop networks,” *Wireless Pers. Commun.*, vol. 74, no. 3, pp. 1033-1044, Feb. 2014.

[18] H.-H. Choi, “Understanding of natural synchronization phenomena and engineering applications,” *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 31, no. 1, pp. 71-81, Jan. 2014.

[19] H.-H. Choi, “Energy-efficient uplink power control based on the flocking model in cellular networks,” *J. KICS*, vol. 41, no. 10, pp. 1186-1189, Oct. 2016.

[20] J. Park, H.-H. Choi, and J.-R. Lee, “Flocking-inspired transmission power control for fair resource allocation in vehicle-mounted mobile relay networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Early Access, DOI 10.1109/TVT.2018.2869270, 2018.

[21] H.-H. Choi and J.-R. Lee, “A flocking-inspired algorithm for fair resource allocation in vehicle-mounted mobile relays,” *J. Network and Comput. Appl.*, vol. 85, pp. 134-142, May 2017.

[22] H. Zhang, J. Llorca, C. C. Davis, and S. D. Milner, “A novel flocking inspired algorithm for self-organization and control in heterogeneous wireless networks,” in *Proc. IEEE ISSNIP*, pp. 239-244, Dec. 2010.

[23] L. Zhang and Y. Zhu, “Mobile sensor deployment based on distributed flocking algorithm,” in *Proc. IEEE ICSPCC*, pp. 1-5, Sep. 2015.

[24] 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.

최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업

2003년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사

2007년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사

2007년 3월~2011년 2월 : 삼성 종합기술원 전문연구원

2011년 3월~현재 : 국립환경대학교 전기전자제어공학과 부교수

<관심분야> 이동통신시스템, 분산 네트워크, 저전력 통신, 무선전력전송, 생체모방 알고리즘