

## 에너지 하베스팅 센서 네트워크에서 협력전송을 이용한 수명연장 기법

황지준, 정해준  
경희대학교 전자공학과

jijun170@khu.ac.kr, haejoonjung@khu.ac.kr

## Expanding Sensor Network Lifetime using Cooperative Transmission in EH-WSN

Jijun Hwang, Haejoon Jung  
Kyung Hee University

## 요 약

에너지 하베스팅 무선 센서 네트워크(EH-WSN)에서는 수확한 에너지를 이용하여 네트워크를 운용하게 되는데, 데이터 전송 주기가 짧아질수록 수확할 수 있는 에너지의 양이 감소하므로 데이터 전송 주기에 따라 네트워크의 수명이 달라지게 된다. 본 논문에서는 협력전송을 이용한 거리확장 기법을 이용하여 에너지 하베스팅 센서 네트워크에서의 수명연장이점을 확인하고 비균일 에너지 하베스팅을 고려했을 때의 수명연장정도를 확인한다. 이를 통해 EH-WSN에서 협력전송은 비협력전송보다 나은 서비스를 제공할 수 있음을 확인하였다.

## I. 서 론

건물의 에너지 효율을 높이기 위한 무선센서네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)는 건물에 분산되어 있는 센서로 수집한 환경 센서 데이터와 제어신호를 전달하는 역할을 수행한다. 대부분의 센서 네트워크에서 센서가 전송한 신호를 Sink 혹은 게이트웨이에서 수집하여 정보를 처리하게 된다. 센서 노드들은 배터리로 구동하기 때문에 네트워크의 수명은 제한적이며 이를 교체하는 과정은 번거로운 동시에 추가 비용이 지속적으로 요구된다. 이를 해결하기 위해 WSN에 에너지 하베스팅(Energy harvesting, EH) 기술을 적용하려는 연구가 이루어졌다. 노드 인근의 빛, 바람, Radio Frequency(RF)등으로부터 에너지를 수확하고 수확한 에너지를 이용해 노드의 배터리를 충전함으로써 네트워크의 수명을 연장한다. 하드웨어의 결함이 없다면, 이상적으로는 무한한 네트워크 수명을 얻을 수 있다. 그러나 에너지를 수확하기 위해서는 수확시간이 필요한데, 이는 전송에 참여하지 않을 때 확보될 수 있지만 전송 주기가 짧아질수록 수확시간도 감소한다. 따라서 EH-WSN에서의 주요 쟁점은 네트워크가 어떤 빈도로 서비스를 제공할 수 있는지가 된다. 본 논문에서는 EH-WSN에서 협력전송의 거리확장을 이용했을 때의 이점을 설명하고 모의실험을 통해 데이터 전송 주기에 따른 네트워크 수명 성능을 확인한다. 또한 지형적 특성을 고려한 비균일 에너지 하베스팅 환경에서의 수명연장을 확인한다.

## II. 본론

## 1) 협력전송을 이용한 거리 확장 전략

다중-홉 네트워크에서 Sink 인근의 노드들은 자신의 센서 데이터를 전송하는 것뿐만 아니라 Sink로부터 멀리 떨어진 노드들의 데이터를 전달받고 이를 다시 Sink에게 전송해야 하기 때문에 에너지 소모가 상대적으로 크다. 해당 노드들은 빠르게 배터리를 소모하게 되고 Sink와 네트워크가 단절되는 문제가 발생하는데 이를 “Energy Hole”이라고 한다

협력전송은 다수의 단일 안테나를 이용해 가상의 다중 입력-단일출력(Virtual Multiple-Input-Single-Output, VMISO) 시스템을 만들 수 있는 기법이다. 전송 노드는 적절한 협력자를 모집하고 센서로 수집한 데이터를 협력자에게 공유한 뒤, 공유한 데이터를 협력자와 함께 전송함으로써 다이버시티 이득과 어레이 이득을 얻을 수 있다. 이때, 신호 대비 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 이점을 통해 전송거리를 확장할 수 있다. 확장된 전송거리를 이용해 Sink 인근의 “Energy Hole”을 뛰어넘음으로써 네트워크의 수명을 연장할 수 있다.

## 2) 가정 및 정의

본 논문에서는 Medium Access Control(MAC) 스케줄링 기법으로 Round Robin 방식을 가정한다. 센서 노드가 수집한 데이터를 전송해야 하는 주기를  $T_{RP}$ 라고 하면  $N$ 개의 노드들은 전송할 때마다  $T_{slot} = T_{RP}/N$  만큼의 시간이 주어진다. 데이터 수집 및 전송 완료 후, 남은 시간동안 에너지를 수확한다고 가정하면 수확가능 시간( $T_{EH}$ )은 총 송수신 시간( $T_{TX}, T_{RX}$ )과 수집 시간( $T_{Sen}$ )을 뺀  $T_{EH} = T_{slot} - T_{TX,RX} - T_{Sen}$ 이 된다. 데이터 센싱 전력( $P_{Sen}$ ), 데이터 송수신 전력( $P_{DATA}^{TX}, P_{DATA}^{RX}$ ), 통신모듈 전력( $P_{com}^{TX}, P_{com}^{RX}$ ), 통합모듈 전력( $P_{ckt}^{TX}, P_{ckt}^{RX}$ ) 및 송수신 시간( $T_{DATA}^{TX}, T_{DATA}^{RX}$ )을 고려했을 때, 필요한 송수신 에너지는 다음과 같다.

$$E_{DATA}^{TX} = (P_{DATA}^{TX} + P_{com}^{TX} + P_{ckt}^{TX})T_{DATA}^{TX} + P_{Sen}T_{Sen}, \quad (1)$$

$$E_{DATA}^{RX} = (P_{DATA}^{RX} + P_{com}^{RX} + P_{ckt}^{RX})T_{DATA}^{RX}. \quad (2)$$

비협력전송은 다음과 같이 에너지 소모를 가정할 수 있으나, 협력전송은 협력자에게 데이터를 공유하는 과정과 다이버시티 이득을 얻기 위한 부호화 과정이 필요하다. 본 논문에서는 직교 다이버시티 채널을 위한 부호화 기법으로 Space-Time Block Codes (STBCs)를 가정한다. 전송과정에서 데이터를 공유하기 위한 에너지와 부호화를  $R$ 로 인해 늘어난 송신시간을 고려했을 때, 전송 노드가 협력전송에 필요한 에너지는 다음과 같다.

$$E_{CT}^{TX} = (P_{DATA}^{TX} + P_{com}^{TX} + P_{ckt}^{TX})T_{DATA}^{TX} \times R + E_{DATA}^{TX} \quad (3)$$

모집된 협력자에게 필요한 에너지는 다음과 같다.

$$E_{CT}^{Coop} = (P_{DATA}^{TX} + P_{com}^{TX} + P_{ckt}^{TX})T_{DATA}^{TX} \times R + E_{DATA}^{RX} \quad (4)$$

### 3) 모의실험 분석

먼저 물리계층에서 경로 감쇄 지수  $\alpha$ 가 3인 slowly varying Rayleigh fading-shadowing 채널을 가정하였으며 VMISO 전송에서 채널은 변화하지 않는다고 가정한다. 그리고 협력전송 과정에서 모집된 협력자 수  $N_c$ 에 따른 다이버시티 이득은 [1]을 참조하였다. 최대  $N_c$ 는 4로 설정되었으며 네트워크의 크기는  $60m \times 60m$ 로 설정되었다. 각 노드의 최대 전송거리(최대 송신 전력 사용시)는 20m로 설정되었으며 네트워크마다 최대 0.5J의 에너지를 가질 수 있는 150개의 노드가 무작위로 네트워크에 균일하게 배치되었다. Sink의 위치는 네트워크의 최하단 중앙에 고정했다. 노드 ID는 Sink로부터 가까울수록 작은 ID가 부여된다. 그리고 전송은 ID가 작은 순으로 순차적으로 진행되도록 설정하였다. 전송에 필요한 시간과 에너지는 표 1을 참조한다. 협력자 모집과정은 잔여 에너지 기반 협력전송 기법인 Residual-Energy-Activated Cooperative Transmission(React) [2]를 선택하였다.

Power (mWatt)		Time(mSec)
$P_{Data}^{TX} = P_{Data}^{RX} = 28.71$	$P_{Sen} = 82.50$	$T_{Data}^{TX} = 35$
$P_{com}^{TX} = P_{com}^{RX} = 32.87$	$P_{EH} = 0.416$	$T_{Data}^{RX} = 35$
$P_{ckt}^{TX} = P_{ckt}^{RX} = 38.71$	$P'_{EH} = 1.275$	$T_{Sen} = 7.5$

표 1. Power and time values.

에너지 하베스팅 환경에서 네트워크의 지속 여부를 확인하기 위하여 초기 시작 에너지는 0.05J로 설정하였다. 비협력전송 기법으로 에너지 인지 라우팅 기법인 Capacity Maximization (CMAX)을 선택하였다. React의 사전 경로 형성을 위하여 Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) 라우팅과 CMAX를 선택하였다. 지형적 특성으로 햇빛에 의한 추가 광전효과를 가정하였으며 추가 광전효과( $P'_{EH}$ )는 네트워크의 모서리 좌측과 우측에 10m 간격으로  $5m \times 5m$  크기의 정사각형 구역에서 발생한다고 가정하였다. 그리고 각 실험은  $T_{RP}$ 당 20번씩 시행되었으며 실험당 전송가능한 최대 패킷의 수는  $10^4$ 개이다. 마지막으로 네트워크의 수명은 First Death Lifetime (FDL)로 평가한다.

그림 1에서 데이터 전송 주기에 따른 비협력전송과 협력전송의 성능 차이를 확인할 수 있다. 비협력전송은 실험 한계치에 도달하지 못하는 반면, 협력전송은  $T_{RP} = 30s$ 부터 실험 한계치에 도달하고 있다. 협력전송은 데이터 공유 및 부호화로 인해 송수신시간이 증가하므로 에너지 수확량이 적지만 더 높은 수명 성능을 보인다. 이는 비협력전송이 “Energy Hole” 문제를 해결하지 못해 네트워크가 단절되기 때문이다. 또한 협력전송의 사전 경로 형성 기법 중, CMAX는 잔여 에너지가 높은 노드들을 포함하여 경로를 형성하고 AODV는 Sink까지 최소-흡으로 경로를 형성한다. 에너지 하베스팅 환경에서 노드들의 잔여 에너지는 다각도로 변화하기 때문에 이를 반영할 수 있는 CT-CMAX가 더 높은 수명 성능을 보인다.

그림 2에서는 데이터 전송 주기에 따른 전송기법 별 노드의 평균 잔여 에너지를 확인할 수 있다. 비협력전송은 수명이 큰 폭으로 증가하지 않을 때도 평균 잔여 에너지가 상승하고 있는데 이는 Sink 인근의 노드들은 전송부담으로 인해 여전히 에너지가 부족한 반면, 이외의 노드들은 수확을 통해 에너지가 충전되기 때문이다. 협력전송은  $T_{RP} = 40s$ 부터 평균 잔여 에너지가 노드의 최대 에너지에 접근하기 시작한다. 따라서 하드웨어의 결함이 없는 한, 협력전송은 해당 데이터 전송 주기부터는 노드의 충전과 동시에 네트워크가 서비스를 수행할 수 있으므로 무한한 네트워크 수명을 가질 수 있음을 의미한다.

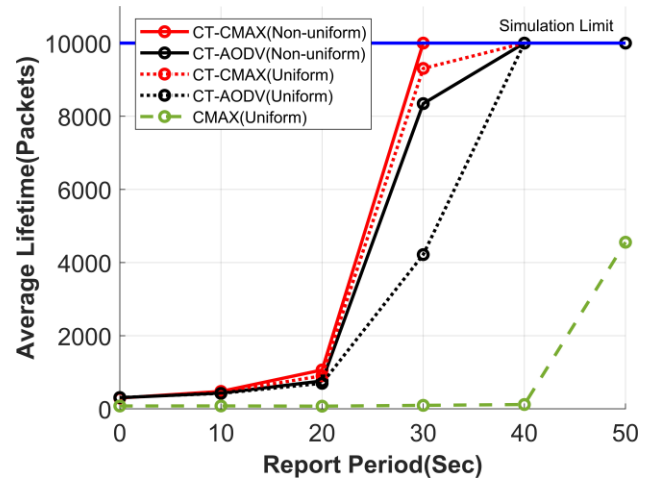


그림 1. Average lifetime.

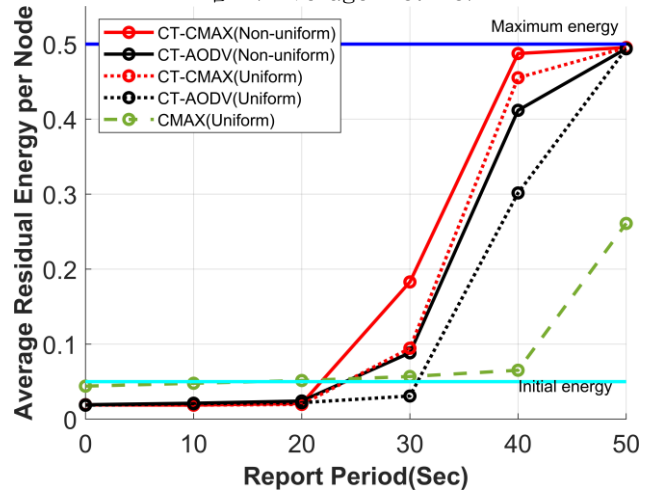


그림 2. Average Residual Energy per node.

### III. 결론

본 논문에서는 EH-WSN 환경에서 협력전송을 이용한 수명연장 전략을 설명하고 협력전송과 비협력전송 간의 네트워크 수명 성능을 비교함으로써 협력전송의 이점을 확인하였다. 또한 비균일 에너지 하베스팅 환경에서의 추가적인 수명 연장 정도를 확인하였다. 이를 통해 EH-WSN에서 협력전송은 비협력전송보다 더 빈번하게 데이터를 수집하고 전송할 수 있으며 일정 데이터 전송 주기를 넘어서면 무한한 수명을 가질 수 있음을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Korea government (MSIT) in part under the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by (LINC3.0, NRF-2021M1A2A2061357, NRF-2022R1F1A1065367 and NRF-2022R1A4A3033401), and in part under the ITRC support program (IITP-2021-0-02046).

### 참고 문헌

- [1] J. W. Jung and M. A. Ingram, "Lifetime Optimization of Multi-hop Wireless Sensor Network by Regulating the Frequency of Use of Cooperative Transmission," in The 2011 Military Communications Conference.
- [2] J. W. Jung and M. A. Ingram, "Residual-energy-activated cooperative transmission (React) to avoid the energy hole," in Proc. 2010 IEEE ICC Workshop on Cooperative and Cognitive Mobile Networks.