

# 협력전송 기반 에너지 효율적 라우팅 프로토콜

황지준, 정해준  
경희대학교 전자공학과

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

## Energy Efficient Routing Protocol using Cooperative Transmission in Wireless Sensor Network

Jijun Hwang, Haejoon Jung  
Department of Electrical Engineering, Kyung Hee University

### 요 약

다중-홉 무선센서네트워크에서 협력전송의 거리확장 기법은 Sink 인근의 노드들이 높은 전송부담으로 인해 네트워크 수명이 단축되는 “Energy Hole” 문제를 해결할 방법으로 제안된다. 협력전송은 인근의 노드들과 함께 전송하는 과정을 통해 얻는 다이버시티 이득을 이용하여 전송범위를 확장할 수 있다. 그러나 다이버시티 이득에는 한계가 있으며 인근의 노드가 부족할 경우 전송범위 확장도가 부족해 Sink 까지의 직접 전송이 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 협력전송의 수신자를 센서 노드로 확장한 알고리즘을 제안하고 기존 협력전송과의 성능을 비교한다. 모의 실험 결과, 제안하는 기법은 9~39%까지 네트워크 수명을 연장할 수 있음을 확인하였다.

### I. 서 론

건물의 에너지 효율을 높이기 위한 무선센서네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)는 건물에 분산된 센서를 이용해 환경 센싱 데이터와 제어신호를 전달하는 역할을 수행한다. 많은 센서 네트워크에서 센서가 전송한 신호는 Sink 혹은 게이트웨이가 수집하여 정보를 처리하게 된다. 다중-홉 네트워크에서 Sink 인근의 노드들은 제한된 전송범위로 인해 자신의 센서 데이터를 전송하는 것과 동시에 Sink로부터 멀리 떨어진 노드의 데이터를 전달받고 이를 다시 Sink에게 전송해야 하기 때문에 에너지 소모가 상대적으로 크다. 제한된 배터리로 구동하는 센서의 특성상 Sink인근의 센서 노드들은 전송 부담으로 인해 빠르게 수명을 다하고 이로 인해 Sink와 네트워크가 단절되는 문제가 발생하는데 이를 “Energy Hole”이라고 한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 송신 노드와 인근의 노드가 동일한 데이터를 함께 전송함으로써 전송범위를 확장하는 협력전송이 제안되었으며, 네트워크 수명을 큰 폭으로 연장할 수 있음이 확인되었다[1]. 그러나 협력전송은 서로 다른 직교 채널로부터 얻는 다이버시티 이득을 활용하기 때문에 송신 안테나 수가 증가할 수록 얻을 수 있는 추가적 이득은 감소한다. 따라서 전송범위의 확장도는 한계가 존재한다. 또한 인근의 노드들이 부족한 경우, 협력전송을 이용한 Sink로의 직접전송이 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 Sink로 직접 전송만을 시도하는 기존 연구와 달리 센서의 제한된 전송범위를 고려하여 협력전송의 수신자를 Sink뿐만 아니라 센서 노드로 확장한 라우팅 알고리즘을 제안하고, 기존 협력전송과의 성능을 모의 실험을 통해 확인한다.

### II. 본론

#### 1) 사전경로 생성 및 협력전송 시도 조건

먼저 협력전송을 시도하기 어려운 경우, 비협력전송을 해야 하므로 이를 위한 사전경로를 생성한다. 사전 경로 내에서 송신 노드를  $n_{TX}$ , 수신 노드를  $n_{RX}$ 라고 했을 때, 네트워크 에너지 효율을 얻기 위해서는  $n_{TX}$ 가 협력전송을 시도함으로써  $n_{RX}$ 의 전송부담을 완화하는 상황이 가장 이상적이다. 노드의 잔여 에너지  $E_{re}(n)$ 가 낮을수록 높은 전송부담을 의미하므로 이를 통해 협력전송의 시도 조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{re}(n_{TX}) > E_{re}(n_{RX}) \quad (1)$$

#### 2) 협력자 모집과정 및 직접전송 가능 여부 판단

본 논문에서는 협력전송을 통한 Sink로의 직접전송은 [2]를 기반으로 한다. 조건 (1)을 만족할 경우,  $n_{TX}$ 는 자신의 전송범위 내의 노드들로부터 협력자를 모집한다. 노드와 Sink 사이의 거리  $d_s$ 가 가깝고 잔여 에너지가 충분한 노드들을 모집함으로써 효율적인 협력전송을 시도할 수 있으므로 모집조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{re}(n_i) > \max(E_{re}^{avg}, E_{re}(n_{RX})), \quad (2)$$

$$d_s(n_i) < d_s^{avg}. \quad (3)$$

$E_{re}^{avg}$ 와  $d_s^{avg}$ 는 전송범위 내의 노드들의 평균 잔여 에너지와 Sink 사이의 평균 거리이다. 조건 (2), (3)을 만족하는 노드 집합  $S_p$ 에  $n_{TX}$ 가 포함된 집합을  $S_{CT} = \{n_{TX}, S_p\}$ 라고 할 때,  $S_{CT}$ 에 속한 노드들이 동일한 전송 전력을 소모했을 때 직접전송이 가능한지 확인해야 한다. 협력 노드들의 수  $N_c$  ( $N_c = |S_{CT}|$ )에 따른 다이버시티 이득을  $G(N_c)$ 라고 하면 각 협력 노드들이 사용하는 전송 전력은 다음과 같다.

$$P_{TX,min} = (P_{RX} \cdot d_{req}^\alpha) \beta, \quad (4)$$

$$d_{req} = \left( 10^{\frac{G(N_c)}{10}} \sum_{i=1}^{N_c} d_s(n_{c,i})^{-\alpha} \right)^{-1/\alpha}. \quad (5)$$

$\alpha$ 는 경로손실 지수,  $\beta$ 는 상수,  $P_{RX}$ 는 수신 노드가 복조를 위해 요구하는 최소 수신전력이다.  $P_{TX,min}$ 가 각 노드의 최대 전송 전력을 넘어설 경우에는 협력전송을 시도할 수 없으므로, 최대 전송 전력을 소모했을 때 전송가능한 최대 거리를  $d_{tx}^{max}$ 라고 하면 수식 (4)과 (5)를 이용해 거리에 대한 조건으로 수정하면 다음과 같다.

$$d_{req} \leq d_{tx}^{max} \quad (6)$$

조건 (6)이 충족되지 않으면 직접전송이 불가능하므로 조건 (2)만으로  $S_p$ 를 다시 모집한 뒤, 조건 (6)을 충족하는지 확인한다. 이때, 직접 전송이 가능할 경우 Sink로의 협력전송을 시도한다.

#### 3) 협력전송의 수신자 확장

2 번의 모집을 시도해도 직접전송이 불가능한 경우,  $|S_p| \neq 0$ 일 때 협력전송의 수신자를 사전경로 내의 노드들로 설정한다. 수신자를 협력전송의 확장가능한 범위 내 모든 노드들로 구성할 경우, 범위 내  $E_{re}(n)$ 이 가장 큰 노드를 선택함이 유리하다.

그러나 센서 노드가 그런 정보를 얻는 건 매우 어려우며 범위 내 모든 노드들이 잔여 에너지 정보를 전송하기 위해 Idle 상태를 벗어나야만 한다. 이는 광범위한 에너지 소모로 이루어진다[2]. 따라서 사전 경로 내의 노드들을 수신자로 설정하고  $N_c$ 에 비례해 사전 경로 내의 뛰어 넘는 노드들의 수를 달리한다. 이때 직접전송 과정과 달리 협력전송이 가능한지 불가능한지 확인하는 절차를 거치지 않는데 이는  $d_s$ 와 달리  $n_{TX}$ 와 사전경로 내의 노드들 간의 거리정보가 없기 때문이다. 예를 들어  $N_c = 2$ 라면, 확정적으로 전송범위를 2 배 확장 가능하므로 사전경로 내의 1-홉을 뛰어넘는다.  $|S_p| = 0$ 이라면(모집 가능한 협력자가 없다면), 비협력전송을 진행한다.

#### 4) 모의실험 분석

먼저 물리계층에서 Slowly varying Rayleigh fading-shadowing 채널을 가정하며 협력전송 중에 각 노드들의 채널은 변화하지 않는다고 가정한다. 그리고 직교 다이버시티 채널을 위한 부호화 기법으로 Space-Time Block Codes (STBCs)를 가정한다. 협력전송 과정에서 모집된 협력자 수  $N_c$ 에 따른 다이버시티 이득은 [3]을 참조하였으며 최대  $N_c$ 는 4로 설정되었다. 각 노드의 최대 전송거리  $d_{tx}^{max}$ (최대 전송 전력 사용시)는 20m로 설정되었으며 네트워크마다 0.05J의 초기 에너지를 가지는 100개의 노드가 무작위로 네트워크에 균일하게 배치되었다. Sink의 위치는 네트워크의 최하단 중앙에 고정하였다. 노드 ID는 Sink로부터 가까울수록 작은 ID가 부여된다. 그리고 전송은 ID가 작은 순으로 순차적으로 진행되도록 설정하였다. 모의실험은 네트워크 크기에 따라 각각 20번씩 수행되었으며 매 실험마다 Sink를 제외한 노드들은 무작위로 재배치된다. 센서 노드의 에너지 소모는 데이터 수집을 위한  $E_{sen}$ , 송신 및 수신에 위한 회로 에너지 소모  $E_{ckt}$ 와 전송전력과 패킷 길이에 따른 에너지 소모  $E_{TX} = P_{TX}L$ 을 가정하며 표 1을 참조한다. Sink는 에너지가 감소하지 않는다고 가정한다. 비협력전송을 위한 사전경로 형성 기법으로 최소 홉을 선택하는 Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) 라우팅과 에너지 인지 라우팅 기법인 Capacity Maximization (CMAX)을 선택하였다. 비교를 위한 협력전송은 [2]에서 제시된 기법을 활용한다. 마지막으로 네트워크의 수명은 First Death Lifetime (FDL)로 평가한다.

그림 1에서는 네트워크 크기에 따라 기존 기법과 제안하는 기법의 성능 차이를 확인할 수 있다. 네트워크의 크기가 작은 60M의 경우, 네트워크의 크기가 작아 적은 협력자만으로 Sink까지의 직접전송이 가능하다. 따라서 기존 기법과 큰 성능차가 발생하지 않는다. 그러나 네트워크의 사이즈가 커지는 시점부터 최소 9%에서 39%까지 네트워크 수명이 차이남을 확인할 수 있다. 또한 사전경로 설정 기법에 따라 성능 차이도 확인할 수 있었는데, 네트워크 사이즈가 작은 경우에 AODV와 CMAX 간의 네트워크 수명 성능이 큰 차이가 없다. 하지만 네트워크 사이즈가 커질수록 Sink까지의 경로에 더 많은 홉이 요구되므로 잔여 에너지를 고려한 라우팅 기법이 훨씬 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 2에서는 80M 환경에서 노드 ID 별 잔여 에너지를 나타낸다. 기존 기법은 Sink로부터 멀리 떨어진 노드들이 다른 노드들보다 큰 잔여 에너지를 가진다. 해당 노드들은 Sink까지의 직접전송을 수행할 수 없으므로 비협력전송을 통해 데이터를 사전 경로 내의 노드들에게 전달해야만 한다. 이는 곧 잔여 에너지 불균형으로 이어진다. 그러나 제안하는 기법의 경우, 수신자를 Sink로 제한하지 않으므로 직접전송이 불가능한 경우에도 협력전송이 가능하다. 또한 모집한 협력자 수에 따라 사전 경로 내의 뛰어 넘는 노드들의 수가 다르므로 발생한 데이터 트래픽은 사전 경로 내의 노드들에게 적절히 분배될 수 있다. 이는 잔여 에너지 분포를 통해 확인할 수 있다. 즉 네트워크 외각의 노드들의 잔여 에너지를 추가 소모함으로써 네트워크의 수명을 연장하는 것이다. 또한 평균 잔여 에너지 소모량은 CMAX가 AODV보다 높음을 확인할 수 있는데, 이 역시 잔여 에너지 소모를 통해 추가적인 수명을 얻는 것이다. 따라서 네트워크 수명연장은 네트워크 내의 노드들의 잔여 에너지를 적절히 제어함으로써 얻을 수 있음을 알 수 있다.

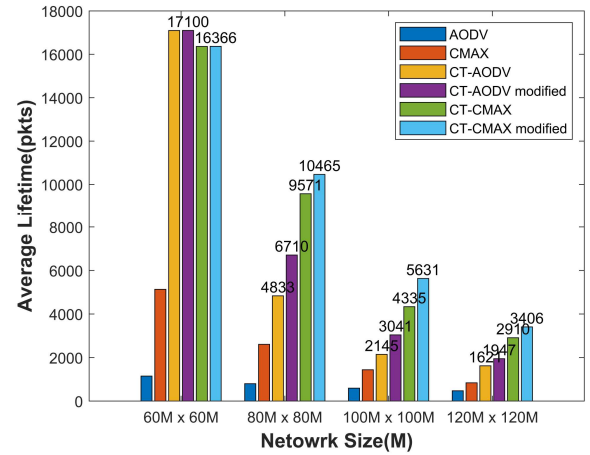


그림 1. 평균 네트워크 수명

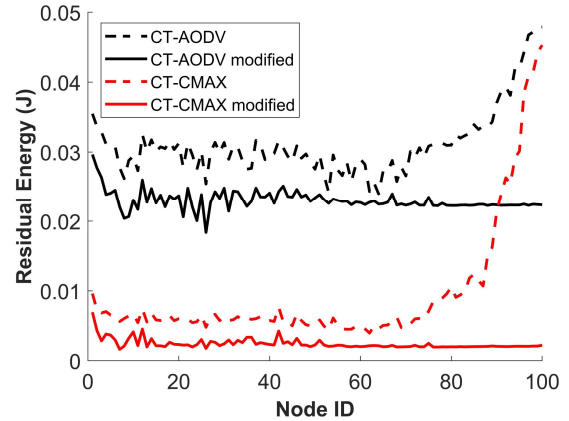


그림 2. 잔여 에너지 분포 (80M x 80M)

$E_{TX}^{ckt}$	45nJ/bit	$\alpha$	3
$E_{RX}^{ckt}$	135nJ/bit	$P_{RX} \times \beta$	1fJ/bit/m <sup>3</sup>
$E_{sen}$	60nJ/bit	$L(\text{Packet Length})$	128bit

표 1. Simulation Parameters.

### III. 결론

본 논문에서는 WSN 환경에서 협력전송을 이용한 직접전송이 어려운 원인을 설명하고 이를 해결하기 위한 새로운 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 수신자를 Sink에서 센서 노드까지 확장함으로써 더 나은 에너지 효율을 확인할 수 있었으며 높은 효율성을 통해 네트워크 수명의 연장을 확인할 수 있었다. 또한 모의실험 결과분석을 통해 네트워크 수명 연장은 잔여 에너지 제어에 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. Lin *et al.* "On cooperative transmission range extension in multi-hop wireless ad-hoc and sensor networks: A review," in *Ad Hoc Network*, 29, pp. 124-126
- [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*.
- [3] 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*.