

무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 토폴로지 구성 알고리즘

노태호^o, 최웅철, 이승형, 정광수

광운대학교 전자공학부 컴퓨터통신연구실

thno^o@adams.kw.ac.kr, {wchoi, shrhee, kchung}@daisy.kw.ac.kr

Energy-Efficient Topology Construction Algorithm for Wireless Sensor Networks

Taeho Roh^o, WoongChul Choi, Seung Hyong Rhee, Kwangsue Chung
School of Electronics Engineering, Kwangwoon Univ.

Abstract

무선 센서 네트워크는 제한된 배터리를 갖는 노드로 토폴로지를 구성한다. 이러한 이유 때문에 전체 네트워크의 수명을 극대화하고 라우팅에 에너지 효율성을 고려하여 토폴로지를 구성하는 것이 중요하다. 네트워크 토폴로지는 전송범위에 의해 결정되며 노드의 고정된 전송범위로 인한 에너지 비효율성 문제를 해결하는 방법으로 최적의 전송범위 혹은 MST(Minimum Spanning Tree)기반으로 토폴로지를 구성하는 대안이 있지만 최적의 솔루션은 아니다. 본 논문에서는 단계에 따라 전송범위를 차별화시켜 라우팅을 수행하는 DR(Differential Routing)을 제안하였다. DR은 전송범위에 기반하여 최적의 토폴로지를 구성한다. 그리고 무선 센서 네트워크의 특정한 통신 패턴에 맞게 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계의 전송범위를 차별화시켜 전송파워를 조절함으로써 전체 네트워크의 수명 극대화, 파티션 방지, 그리고 에너지 효율성을 향상시킨 알고리즘이다. 실험을 통해 제안한 DR이 최적의 토폴로지를 구성하여 에너지 효율성 측면에서 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

무선 센서 네트워크는 센싱, 컴퓨팅, 그리고 무선 통신 능력을 갖춘 초소형의 디바이스로 구성된다. 각 노드에서 센싱된 데이터는 자체적으로 컴퓨팅되어 무선 통신을 통해 다음 노드로 전송된다. 이러한 모든 행위는 제한된 배터리 파워에 의존적이다. 예를 들어, 한 노드의 에너지 고갈로 인해 전체 네트워크의 수명을 감소시키고 네트워크 파티션을 야기하여 전체 시스템의 성능을 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 이유 때문에 네트워크 관점에서 노드 혹은 전체 네트워크의 수명을 극대화하고 라우팅 동작에 에너지 효율성을 고려하는 것이 중요하다.

무선 센서 네트워크는 무선 통신기반으로 네트워크를 형성하고 라우팅을 수행하는 측면에서 ad-hoc 형태를 갖지만 통신 패턴에 차이를 보인다. 각 센서노드는 센싱된 비교적 작은 데이터를 다음 노드로 전송하고 최종 목적지인 BS(Base Station) 혹은 싱크로 데이터 게더링이 이루어지는 특정한 통신 패턴을 가지고 있다. 즉, 모든 센서 노드에서 BS로 라우팅이 이루어지는 all-to-one 통신 형태이다.

이러한 특정한 통신 패턴에서 네트워크 이슈를 풀어나가는 하나의 요소로써 전송범위를 고려하였다. 그 이유는 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫째, radio model의[4] Tx amplifier 컴포넌트에서 파워에 영향을 주는 파라미터는 SNR이 고려된 E_{amp} , 거리, 비트이다. E_{amp} 와 비트가 일정하다고 가정할 때 파워는 전송범위에 의존적이다. 둘째, 한 노드의 전송범위는 링크 수를 결정하게 되고 전체적으로 볼 때 네트워크 토폴로지를 결정한다[1]. 셋째, 전송범위는 네트워크 이슈에 대한 하나의 trade-off로 작용한다[2].

직관적으로 보더라도 짧은 전송범위는 여러 관점에서 상대적으로 더 낫지만 가장 큰 문제는 네트워크 파티션이 심각하게 발생한다는 점이다. 그래서 최적의 전송범위를 결정하는 것이 중요하다. 결론적으로 전송범위는 네트워크 혹은 에너지 측면에 영향을 줄 수 있는 중요한 요소 중의 하나이다.

본 논문에서는 노드의 전송범위를 기반으로 최적의 토폴로지를 구성하여 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계에 따라 전송범위를 차별화시켜 라우팅을 수행하는 DR를 제안하였다. DR은 초기에 트리 토폴로지를 구성해 갈 때 각 노드에서 데이터 수집을 위한 전송범위를 결정하게 된다. 그 후 데이터 수집 단계에서 결정된 전송범위에 입각하여 전송파워를 조절함으로써 네트워크 이슈와 에너지 측면의 효율성을 향상시킨 라우팅 알고리즘이다.

본 논문의 구성은 2장에서 전송범위에 대한 일반적인 접근 방식과 그 솔루션으로 대두된 방식의 문제점을 간단한 실험을 통해 제시하고, 3장에서는 각 노드의 전송범위 결정 문제에 따른 솔루션으로 고려된 업링크와 다운링크에 대한 개념과 DR의 세부 알고리즘을 기술하였다. 4장에서는 제안한 알고리즘으로 형성된 최적의 토폴로지를 제시하고 간단한 radio model[4]로 제안한 알고리즘의 에너지 효율성을 평가하였으며 5장에서는 결론 및 향후 과제에 대해 기술하였다.

2. 관련 연구

대부분의 프로토콜들은 고정된 전송범위를 가지고 토폴로지를 구성한다. (예를들어 최대 전송 파워)[3] 이것은 일반적인 접근 방식이며 토폴로지 구성이 간단하지만, 전송 파워 조절이 없기 때문에 에너지 측면에서 비효율적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 최적의 전송범위를 결정하는[2] 것이 중요하며 라우팅 알고리즘 측면에서 MST(Minimum Spanning Tree)기반으로 토폴로지를 구성하는 접근 방식도 있다[1]. 그러나 에너지

* 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구[R01-2005-0000-10934-0(2005)]의 지원에 의해 수행되었음.

측면에서 비효율적인 면을 보인다.

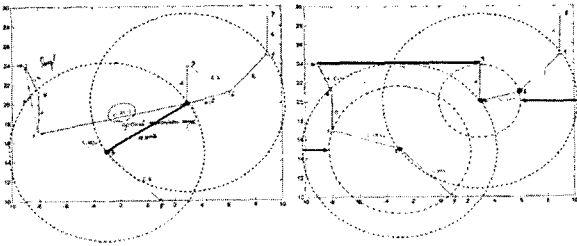


그림1. Critical 전송범위 그림2. MST-기반 알고리즘
두 그림은 10개의 노드가 랜덤하게 배치된 네트워크에서 MATLAB을 사용하여 얻은 결과이다. 각 알고리즘의 토폴로지 구성 결과를 보여준다. 그림1은 [2]에서 제안된 알고리즘으로 최적의 전송범위를 결정하여 토폴로지를 구성한 결과이다. [2]에서 제안된 알고리즘은 일단 direct neighbor라는 개념으로 노드 간 링크를 결정하고 발생 가능한 루프 링크를 제거한 후 최대 링크를 최적의 전송 범위로 결정하는 방식이다. 각 노드는 그 결정된 전송범위로 토폴로지를 구성한다. 반면, MST는 어떤 기준에서 최고(the best)라고 생각되는 것만 선택하는 greedy 알고리즘이다. 그림2는 greedy 알고리즘 중에서 prim's 알고리즘을 적용하여 얻은 결과이다.

그림1은 그림2와 비교하여 전송범위 조절 없이 모든 노드가 결정된 전송범위로 파워를 소모하기 때문에 에너지 비효율적이다. 또한 그림2는 각 노드에서 자신의 전송범위로 파워 조절을 하지만 노드 10에서 7로의 링크 전송범위가 매우 크기 때문에 토폴로지 구성이 최적화되지 않아 에너지 측면에서 비효율적이다. 결국 알고리즘을 어떻게 설계하여 최적의 토폴로지를 구성하느냐에 따라 에너지 효율성을 달성할 수 있음을 의미한다.

3. DR algorithm

본 논문에서는 최적의 토폴로지를 구성하고 트리 구성 단계와 데이터 수집 단계의 전송범위를 차별화시켜 전송파워를 조절함으로써 기본적으로 네트워크의 수명 극대화, 파티션 방지, 에너지 효율성을 향상시킨 DR (Differential Routing)을 제안하였다. 네트워크의 수명을 극대화하는 기본적인 개념으로 파워 효율적인 데이터 수집, 라운드 당 전체 소모 에너지의 최소화, 그리고 각 노드에서 파워 소모의 균형을 잡기 위해 로드 밸런싱을 기본으로 고려하였다.

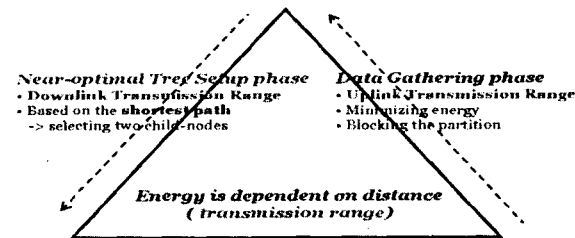


그림3. DR의 기본 개념

그림3은 DR의 기본 개념을 보여준다. 최초 BS에서 트리 구성을 시작하고 각 노드는 두 개의 자식 노드를 선택하여 그 중 긴 노드의 전송범위를 다운링크 전송 범위로 결정한다. 동시에 각각의 노드는 이웃 노드와 서로 비교해서 얻은 가장 짧은 거리를 업링크로 결정하게 된다. 데이터 수집 단계에서 그 결정된 업링크 전송 범위로 라우팅이 수행된다.

3.1 Determination of Transmission Range

각 노드의 전송범위 결정은 트리 구성이 이루어진다. 그림4에서 노드 a와 b의 전송범위는 각각 d_{ab} , d_{bc} 로 결정 된다. 그러나



그림4. 전송범위 결정

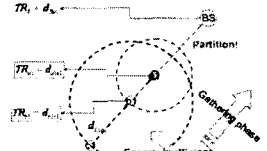


그림5. 문제

문제는 데이터 수집이 수행되는 시기에 발생한다. 그림5는 결정된 전송범위로 데이터 수집이 이루어질 때의 문제점을 보여준다. 노드 b의 경우 결정된 전송범위로 노드 a에게 전송할 경우 에너지 비효율적이며, 노드 a의 경우 BS에게 전송할 경우 파티션을 야기한다. 이 문제에 대한 해결방법으로 트리 구성시 각 노드는 다운링크와 업링크에 대한 전송범위를 결정한다.

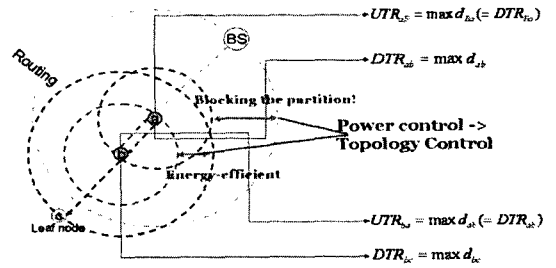


그림6. 중간 노드의 파워 컨트롤

노드 a의 다운링크는 d_{ab} , 업링크는 BS의 전송범위 d_{ba} 로 결정된다. 또한 노드 b의 다운링크는 d_{bc} 이며, 업링크는 a의 전송범위인 d_{ab} 로 결정된다. 이렇게 결정된 전송범위를 기반으로 라우팅을 수행하기 때문에 에너지 비효율성과 네트워크 파티션 문제를 해결할 수 있다. 그림6은 그 개념과 결정된 전송범위를 기반으로 중간 노드에서 파워 컨트롤하는 것을 보여준다.

3.2 Algorithm Description

All nodes know the location information.

I. Tree Setup Phase (re-setup or query)

```

1. if BS,
2.   Selecting the one nearest node, i
3.    $DTR = d_{bi}$ 
4.    $Ts = \{BS, i\}$ 
5. end
6. for All nodes are included in Ts do
7.   for selected node do
8.     selecting the two nearest node, j and k
9.     if  $d_{ij} < d_{ik}$ ,
10.       $Ns = \{j\}$ ;
11.      temp = {k};
12.       $DTR_i = d_{ik}$ 
13.       $TR_j = d_{ji}$ ;
14.      if  $TR_{j-1} > TR_j$ ,
15.         $UTR_j = d_{ji}$ 
16.         $TR_{j-1} = TR_j$ 
17.       $TR_k = d_{ki}$ ;
18.      if  $TR_{k-1} > TR_k$ ,
19.         $UTR_k = d_{ki}$ 
20.         $TR_{k-1} = TR_k$ 
21.      end
22.   if included in Ns,
23.      $Ts = \{j\}$ ;
24.   if included in temp,
25.      $Ns = \{k\}$ ;
26. end
    
```

II. Data Gathering Phase

```

1. for  $i=1:N$ 
2.   adjust the original  $TR_i$  based on  $UTR_i$ 
   (the effect of transmit power adjustment)
3.   send the data based on the  $UTR_i$ 
4. end
    
```

DR 알고리즘의 가정은 모든 노드가 각 노드에 대한 거리 정보를 알고 있다는 것이다. 트리 구성 단계에서, 토폴로지 구성은 최초 BS에서 시작하지만 알고리즘의 핵심은 BS가 선택한 노드부터이다. 알고리즘의 종결 조건은 모든 노드가 T_s (Tree Set)에 포함될 때이다. 선택된 노드는 자신과 가까운 두 노드를 선택하여 가장 가까운 노드를 N_s (Nearest Set)에 포함시키고 다음 노드를 temp집합에 포함시킨다. temp에 포함된 노드는 다음 루프시 T_s 에 포함된다. 가장 짧은 노드는 업링크 결정 대상에서 제외시키고 두 번째로 짧은 노드는 업링크를 결정하는데 있어서 비교대상으로 포함시킨다. 12라인에서 다운링크 전송범위가 결정되고, 13-20라인사이에서 이전에 결정된 전송범위와의 비교를 통해서 최적의 업링크 전송범위를 결정한다. 데이터 계층 단계에서 각 노드는 결정된 최적의 전송범위를 기반으로 기존의 전송범위를 조절한다. 이것은 하위 계층의 전송 파워 조절을 야기시키며 전체 네트워크의 수명을 극대화시키고 파티션을 방지하고 에너지 효율성을 향상시킨다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 환경

DR알고리즘은 MATLAB으로 구현되었다. 20 by 20의 네트워크에 10개의 노드를 랜덤하게 배치하였으며 이동성이 없는 정적인 네트워크를 고려하였다.

4.2 결과

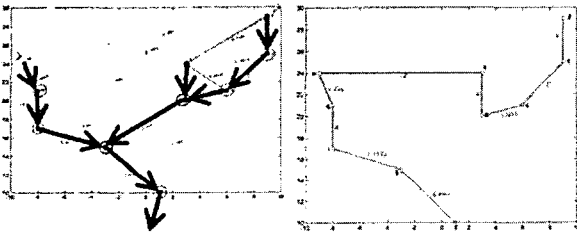


그림7. 토폴로지 비교

그림7에 제안된 알고리즘(왼쪽)과 MST기반 알고리즘(오른쪽)으로 형성된 토폴로지 결과를 제시하였다. 이러한 토폴로지 비교 작업은 노드가 랜덤하게 배치되는 성향에 맞게 20회 이상 수행되었다. 왼쪽 토폴로지에서는 빨간색의 화살표가 의미하는 것은 데이터 수집 단계의 토폴로지 구성을 나타낸 것이다. 직관적으로 보더라도 제안된 알고리즘이 최적의 토폴로지를 형성함을 알 수 있다. MST기반 알고리즘으로 형성된 오른쪽 토폴로지는 각 노드에서 기존 전송범위를 조절하지만 노드7에서 노드10의 링크가 너무 크기 때문에 토폴로지 구성이 최적화 되지 않았다. 이것은 에너지 측면에서 비효율적인 면을 보인다. 그러나, 제안된 알고리즘으로 형성된 왼쪽 토폴로지는 기존 전송범위를 결정된 최적의 업링크 전송범위로 조절함으로써 에너지 측면에서 효율적인 면을 보인다. 이것은 결국 전체 네트워크의 수명을 극대화시킬 수 있음을 의미한다.

다른 측면으로, 트리 기반으로 형성된 왼쪽 토폴로지는 오른쪽과 비교하여 데이터 수집이 빠르게 이루어질 수 있음을 보여준다. 그 이유는 왼쪽 토폴로지는 데이터 수집이 여러 가지로 수행되지만 오른쪽 토폴로지는 선형적으로 이루어지기 때문이다. 이것은 노드 수가 많고 네트워크 크기가 커지는 상황에서 트리 기반으로 토폴로지를 형성하는 것이 더 좋은 성능을 보일 수 있음을 의미한다.

그림8은 각 라운드 당 전체 네트워크의 에너지 소모를 보여준다. 제안된 알고리즘의 에너지 효율성을 보이기 위해서 간단한 레디오 모델, 특성 그리고 에너지 소비 공식으로[4] 에너지 소모를 계산하였으며 초기 각 노드의 에너지는 노드 당 0.5J이며,

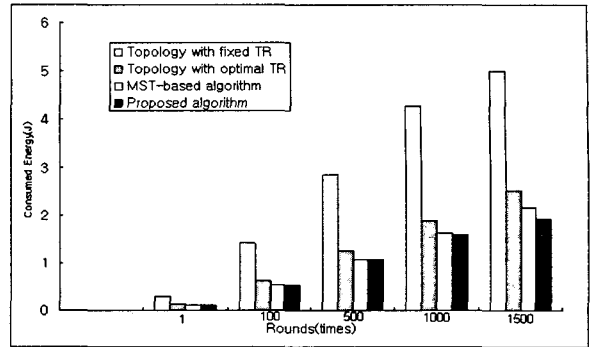


그림8. 전체 에너지 소모

전체 에너지는 5J이다. 고정된 전송범위로 30.364와 최적의 전송범위로 [2]에서 제안된 알고리즘으로 얻은 11.4018을 적용하였다. 고정된 전송범위를 갖는 토폴로지는 전송범위에 대한 조절을 하지 않기 때문에 1500라운드에서 전체 에너지가 완전 소모됨을 확인할 수 있다. 최적의 전송범위를 갖는 토폴로지는 고정된 전송범위를 갖는 토폴로지보다 좋은 성능을 보이지만 MST기반이나 제안된 DR알고리즘보다 네트워크 수명이 짧음을 확인할 수 있다. 그 이유는 전송범위의 조절을 하지 않기 때문이다. MST기반 알고리즘은 전송범위를 조절하기 때문에 고정 혹은 최적의 전송범위를 갖는 토폴로지보다 좋은 성능을 보이지만 제안된 DR알고리즘과 비교해 볼 때 최적의 토폴로지를 구성하지 못하기 때문에 에너지 효율적이지 못하다. 본 결과로부터 제안된 DR알고리즘이 전송범위 조절뿐만 아니라 에너지 효율적인 최적의 토폴로지를 구성하기 때문에 네트워크 수명을 극대화시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후과제

제한된 배터리로 구성되는 무선 센서 네트워크에서 네트워크 계층의 프로토콜은 전체 네트워크의 수명을 극대화시키고 에너지 측면에서 효율성을 갖도록 설계되어야 한다. 또한 무선 레디오 통신으로 각 노드의 연결성을 유지하기 때문에 네트워크 파티션에 대한 문제도 고려되어야 한다. 본 논문은 차별적인 전송범위를 기반으로 에너지 효율적인 토폴로지를 구성하여 이러한 이슈를 다루었다.

향후 과제로는 대규모 네트워크 환경에 제안된 알고리즘을 적용하여 에너지 효율성과 함께 지연을 고려한 연구를 수행할 것이다. 그리고 네트워크 density 혹은 MAC레벨의 간섭을 고려한 다양한 각도의 실험을 수행 할 것이다.

참고 문헌

[1] Jiageng Li, David Cordes, and Jingyuan Zhang, "Power-aware Routing Protocols in Ad Hoc Wireless Sensor Networks", Wireless Communications, IEEE Volume 12, Issue 6, Dec. 2005 Page(s):69 81
 [2] Miguel Sanchez, Pietro Manzoni and Zygmunt J.Hass, "Determination of Critical Transmission Range in Ad Hoc Networks", Proceedings of MMT 1999, October
 [3] Jongmin Shin, Miae Chin and Cheeha Kim, "Optimal Transmission Range for Topology Management in Wireless Sensor Networks", ICOIN 2006, Sendai, Japan, Jan. 15~20,
 [4] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", In Proceedings of the Hawaii Conference on System Sciences, Jan. 2000.