

무선 센서 네트워크에서 최소파워구성 방법을 이용한 선택적 웨이트 컨트롤 알고리즘

박도욱[○] 김종권[○]
서울대학교 컴퓨터공학부
{dwpark[○], ckim[○]}@popeye.snu.ac.kr

Selective weight control using minimum power configuration in wireless Sensor Network

Dwoook park[○], Chongkwon Kim[○]
School of Computer Science and Engineering, Seoul National University

요 약

이 논문은 무선 센서 네트워크에서 최소 파워 구성 방법을 이용하여 에너지를 효율적으로 사용하면서 네트워크의 수명을 늘리고 지연(delay)을 줄이는 방안을 제시한다. 지금까지 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 topology control, power-aware routing, sleep management 방법을 각각 독립적으로 연구되었는데 최소파워 구성은 위의 3가지 방법을 통합 최적화하여 에너지 효율적 사용 문제에 접근한다. 이러한 최소파워 구성 방법을 이용하여 선택적 웨이트 컨트롤(Selective weight control) 알고리즘을 제안하여 네트워크 전체 수명을 연장시키고 지연을 줄일 수 있다. 이 알고리즘은 각 노드가 주기적으로 잔류에너지를 인접노드들과 공유하여 에너지 랭크(rank)값을 유지한 상태에서 최소 에너지 경로를 사용하면서 에너지가 주위 노드들보다 작아질 때는 에너지가 많은 노드가 경로에 포함이 되도록 하여 특정 노드가 에너지 고갈 되지 않고 네트워크내의 각 노드가 고르게 에너지를 소모하게 한다.

1. 서 론

많은 무선 센서 네트워크는 유선 전원 공급 없이 운용하기 위해 에너지를 효율적으로 이용하고 불필요한 에너지 소모를 최소화해야 한다. 무선 센서 네트워크에서 무선통신으로 많은 에너지가 소모되므로 애드 혹 네트워크에서 파워 효율적인 멀티홉 통신을 하기위해 여러 가지 방법이 제안 되었다. 토폴로지 컨트롤(topology control)[1,2]은 네트워크 연결성을 유지하기 위해 노드의 전송 범위를 조정함으로써 전송파워를 줄이는데 중점을 두고 있다

파워 어웨어 라우팅 프로토콜(power-aware routing protocols)은 적절한 전송 범위를 선택하고 멀티홉 패킷 전송에 사용될 에너지를 유지하기 위해 라우팅한다. 토폴로지 컨트롤과 파워 어웨어 라우팅은 전파 송수신 인터페이스가 실질적으로 패킷을 주고받을 때 에너지 소비를 줄이는데 중점을 두고 있다. 그러나 이러한 방법은 노드가 아이들(idle)한 상태일 때 적지 않은 에너지를 소모하기 때문에 충분한 에너지 절약 방법이 아니다. 슬립 매니지먼트 프로토콜(sleep management protocol)은 작은 수의 노드만 액티브(active)하여 멀티홉 전송에 참여하고 나머지는 최대한 전원을 꺼버리는 프로토콜이다.

무선 센서 네트워크는 에너지 소모를 최소화하기 위해 전송, 수신, 아이들(전송 및 수신에 없는 상태) 각 파워 상태에서 에너지 소비를 줄일 필요가 있다. 이것은 앞에서 언급한 세 가지 방법을 효율적으로 모두 적용해야 한다. 그러나 세 가지 방법은 직접적인 방법으로 결합이 될 수 없다. 왜냐하면 네트워크의 전송되는 데이터양에 따라 다른 방법을 적용해야하기 때문이다. 예를 들면 네트워크에서 데이터량이 없을 때 에너지 소모는 아이들 상태에 의해 많이 좌우된다. 이러한 경우 대부분의 노드는 슬립상태로 두고 일부 노드만 전송 범위를 크게 하여 전송하는 것이 네트워크 전체적인 에너지 소모를 줄일 수 있다. 역으로 데이터 량이 많을 때는 전송 및 수신에 많은 에너지를 소모하기 때문에 전송 범위를 최대한 작게 하여 전송하는 방법이 에너지 효율적이다. 최소파워구성(Minimum Power Configuration)은 모든 파워 상태에서 에너지 소비의 총계를 최소화하는 방법이다. 그러나 최소파워구성문제는 NP-complete한 문제이다. 문제를 해결하기 위한 여러 가지 알고리즘이 있지만 ISTH(Incremental Shortest-path Tree Heuristic) 방법이 효율적으로 에너지를 활용하여 에너지 소비 총계를 줄이고 있다. 하지만 이러한 알고리즘은 기존에 전송 및 수신에 참여하는 깨어있는(active) 노드들의 아이들 파워를 최대

한 이용하기 때문에 깨어있는 노드가 빨리 에너지 고갈 상태가 될 수 있다. 이 논문에서는 ISTH 알고리즘에 기초를 두고 에너지를 최소로 활용하면서도 네트워크의 수명을 늘릴 수 있고 지연을 줄이는 방법을 제안한다. 이 방법은 센트리 서비스(sentry service)[4] 방법을 활용하여 비교적 긴 주기로 이웃 노드들 간 에너지 잔류상태를 교환하여 이웃노드들을 비교하여 에너지 잔류 순위를 정하고 웨이트 함수(weight functions)에 순위를 적용하여 에너지가 더 많은 노드로 경로가 설정되도록 한다.

2장에서는 최소파워 설정과 ISTH 알고리즘에 대해서 살펴보고 3장에서는 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 소개하며, 4장에서 결론을 제시한다.

2. 관련연구

무선 센서 네트워크에서 에너지를 보존하기 위한 많은 해결책이 제시되었다. 토폴로지 컨트롤, 파워 어웨어 라우팅, 슬립 메니지먼트 3가지로 대략적으로 구분할 수 있고 3가지를 통합한 최소파워 설정과 ISTH 알고리즘을 간단히 살펴본다.

최소파워설정(Minimum power configuration) 토폴로지 컨트롤, 파워 어웨어 라우팅, 슬립 메니지먼트 3가지 방법을 통합한 방법이다. 토폴로지 컨트롤은 전송파워를 줄임으로써 네트워크의 연결성을 계속 유지하고자 한다. [1]에서 제안한 논문에서는 노드는 파워를 덜 소모하는 다른 노드를 통하여 전달한다. Li 등은 네트워크의 연결성을 유지하기 위해 MST-based 토폴로지 방법을 제안했다. 파워 어웨어 라우팅은 Singh 등이 에너지 소비를 줄이고 시스템 수명을 늘리기 위해 다섯 가지 파워 어웨어 라우팅을 제안했다. Chang과 Tassiulas는 데이터 전송률을 사용하여 네트워크 수명을 최대화하려고 했다. 슬립 메니지먼트는 최근 연구에서 데이터가 없을 때 무선 전송기능을 꺼서 상당한 에너지 소비를 줄일 수 있다는 것을 보이고 있다. [3]에서는 위의 3가지 중 1가지 방법만으로는 에너지를 최적화하여 줄일 수 없기 때문에 통합된 방법인 최소파워설정을 제시한다.

최소파워설정의 정의. [3]에 의해 액티브 노드 u에서의 파워 소비 P(u)는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 P(u) &= \left(1 - 2 \sum_{(u,v) \in I(s_i, t_j)} r_{i,j}\right) \cdot P_{id} \\
 &+ \sum_{(u,v) \in I(s_i, t_j)} r_{i,j} \cdot (P_{tx}(u,v) + P_{rx}) \\
 &= P_{id} + \sum_{(u,v) \in I(s_i, t_j)} r_{i,j} \cdot (P_{tx}(u,v) + P_{rx} - 2P_{id}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

f(s_i, t_j) source s_i에서 sink t_j까지의 데이터 패스이다.

P_{id}, P_{tx}, P_{rx}는 각각 idle상태일 때와 전송할 때, 수신할 때의 파워 소모를 나타낸다.

네트워크 G(V, E)가 있다고 할 때 트래픽 요구량 I라고 할 때 전체 파워 비용 P(G')가 최소가 되고 트래픽 요구량(s_i, t_j, r_{i,j})이 I포함되는 하위그래프 G'(V', E')(V' ⊆ V, E' ⊆ E)와 패스 F(s_i, t_j)를 찾는 것이다.

$$\begin{aligned}
 P(G') &= \sum_{u \in V'} P(u) \\
 &= |V'|z + \sum_{u \in V'} \sum_{(u,v) \in I(s_i, t_j)} r_{i,j} \cdot C_{u,v} \quad (2)
 \end{aligned}$$

이때 C_{u,v}와 z는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 C_{u,v} &= P_{tx}(u,v) + P_{rx} - 2P_{id} \\
 z &= P_{id}
 \end{aligned}$$

같은 flow안에 모든 데이터가 같은 경로를 사용한다면 네트워크 path f(s_i, t_j)는 그래프G'에서 가장 짧은 경로가 된다. 따라서 (2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(G') = |V'|z + \sum_{(s_i, t_j, r_{i,j}) \in I} r_{i,j} \cdot P(s_i, t_j) \quad (3)$$

P((s_i, t_j))는 edge weight C_{u,v} 인 G'(V', E')에서 가장 짧은 경로를 나타낸다. (3)에서 전체 파워 비용은 각 노드의 idle 비용과 각 트래픽 요구에 따른 가장 짧은 경로에 대한 비용의 합으로 나타낼 수 있다. 그러나 이러한 최소파워구성 문제는 NP-complete한 문제이고 해결을 위한 근사 알고리즘은 Matching based 알고리즘과 STH 알고리즘 ISTH 알고리즘 등이 있으며 [3]에서 ISTH가 가장 최적화된 방법이라고 소개하고 있다.

ISTH(Incremental Shortest-path Tree Heuristic) 각 새로운 경로가 생성될 때 기존에 있던 경로를 사용함으로써 idle 비용을 최소화 하는 방법이다. 웨이트 함수와 알고리즘은 다음과 같다.

$$h_i(u, v) = \begin{cases} r_i \cdot C_{u,v} & u \text{ is active} \\ r_i \cdot C_{u,v} + z & \text{otherwise} \end{cases}$$

```

Input: G(V,E), source set S, sink t and traffic demands I
Output: G'(V', E')
1. Initialize G'(V', E') to be empty.
2. Label all nodes as asleep.
3. W = S.
4. while W ≠ ∅
5. Choose a random si from W and find the shortest path from si to t with edge weight hi(u, v) in G(V,E).
6. Add the shortest path found to G.
7. Label all nodes on the path as active.
8. W = W - si.
9. end
    
```

ISTH는 전체 에너지 소비를 최소화하지만 기존에 존재하던 데이터 경로를 사용하기 때문에 특정 경로에 해당하는 노드들의 에너지 고갈이 되어 네트워크 연결성 문제가 될 수 있다.

3. Selective Weight Control (SWC) 알고리즘

선택적 웨이트 통제 알고리즘(SWC)은 ISTH(Incremental Shortest-path Tree Heuristic) 기초로 전체 네트워크의 수명에 연장에 중점을 두었다. ISTH와의 차이는 네트워크 수명을 늘리기 위해 경로 설정할 때 기존에 사용되는 경로를 우선적으로 사용하되 주위 노드들과의 에너지 잔류상태를 비교하여 어느 정도 기준 이상 차이가 발생할 때는 에너지가 좀 더 많은 노드를 경로로 선택하게 하는 알고리즘이다.

3.1 웨이트 함수

웨이트 함수 $S_i(u, v)$ 는 다음과 같다.

$$S_i(u, v) = \begin{cases} r_i \cdot (C_{u,v} - wR) & u \text{ is active} \\ r_i \cdot (C_{u,v} + wR) - z & \text{otherwise} \\ & (wR < z) \end{cases}$$

r_i 는 데이터 전송률을 나타내고 R 은 이웃 노드 중 에너지 순위를 나타낸다. 예를 들어서 자신 노드(u)의 이웃 노드(직접적인 송수신이 가능한 노드)중 v 노드의 에너지 순위가 제일 에너지가 많다면 순위 R 은 1이 될 것이다. w 는 순위 적용 비율을 나타낸다. 이처럼 순위를 적용하게 된 근본적인 이유는 네트워크의 총 에너지소모를 최소화하면서도 네트워크의 연결성을 보장하여 네트워크 수명을 보장하기 위한 것이다. 이웃 노드와 에너지 순위를 정하는 방법은 센트리 서비스(Sentry Services) 방법[4][5]를 사용한다. 센트리 서비스는 밀도가 높은 네트워크 환경에서 특정목적(감시 등)을 위해 일부 노드들만 데이터 전송에 참여하고 나머지는 깊은 수면상태에 있게 하여 에너지를 효율적으로 사용하는 에너지 관리 기법이다. 이러한 기법을 라우팅 방법에 적용하여 에너지가 높은 이웃노드가 데이터 전송에 참여하는 확률을 높게 조정하여 네트워크의 수명을 늘일 수 있다. 웨이트 함수에서 순위를 정하는 방법은 1단계로 이루어진다. 각 노드는 이웃노드와 헬로 메시지를 통하여 메시지를 교환한다. 헬로 메시지는 노드 ID, 에너지 잔류상태가 포함한다. 그러나 불필요하게 자주 헬로 메시지를 교환하는 것은 각 노드의 에너지 소모를 초래하고 네트워크의 오버헤드 문제를 야기하기 때문에 가능한 적게 교환하는

것이 타당하다. 데이터양이 아주 적다면 메시지 교환 주기가 1일 이상이 될 수도 있고 데이터양이 많다면 1일 이내가 될 수 있다.

3.2 알고리즘

Selective weight control (SWC) 알고리즘은 다음과 같으며 ISTH와의 차이는 웨이트 함수 $S_i(u, v)$ 를 사용한다는 것이다.

```

Input:  $G(V,E)$ , source set  $S$ , sink  $t$  and traffic demands  $I$ 
Output:  $G'(V',E')$ 
1. establish energy rank of neighbor
2. Initialize  $G'(V',E')$  to be empty.
3. Label all nodes as asleep.
4.  $W = S$ .
5. while  $W \neq \emptyset$ 
6. Choose a random  $s_i$  from  $W$  and find the shortest path from  $s_i$  to  $t$  with edge weight  $S_i(u, v)$  in  $G(V,E)$ .
7. Add the shortest path found to  $G$ .
8. Label all nodes on the path as active.
9.  $W = W - s_i$ .
10. end
    
```

그림 1은 source 2에서 sink까지의 경로(녹색)가 시간이 지남에 따라 에너지가 많은 노드를 선택하여 바뀌는 모습을 보여주고 있다. 다시 노드 3이 노드 5보다 에너지가 적어진다면 (a)같은 경로를 선택하게 된다. 그러므로 SWC 방법은 ISTH보다는 전체 총에너지는 더 많이 소모할 수 없지만 네트워크의 수명을 연장하고 병목현상을 방지하여 데이터양이 많을 때 발생하기 쉬운 delay문제를 해결할 수 있다.

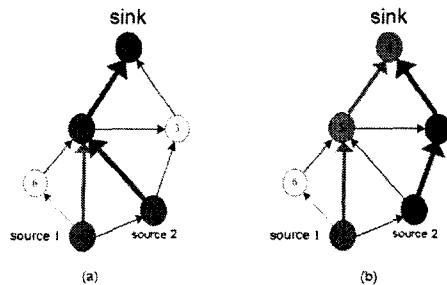


그림 1 : (a)에서 source 2의 경로는 source 1에서 sink까지 경로를 공유한다. (b)에서는 노드 5가 많은 에너지를 소모하여 source 2는 노드 3을 경로로 선택한다.

라우팅에서는 각 노드가 표1과 같이 라우팅 테이블을 유지한다. 데이터 테이블은 라우팅 엔트리와 이웃노드들의 상태를 포함한다: $\langle r_i, \text{next hop}, \text{cost}, \text{seq} \rangle$ r_i 는 데이터 전송률을 나타내고 next hop 은 sink 까지 비용이 최소가 되는 이웃 노드를 나타내고 cost 는 노드 u 에서 sink 까지의 비용이다. seq 는 sink 에서 생성된 일련번호이다.

[4]Tian He, Pascal Vicaire, Ting Yan, "Achieving Long-Term Surveillance in vigiNet ",ininfocom, 2006.
 [5]T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, "An Energy-Efficient Surveillance System Using Wireless Sensor Networks," in MobiSys'04, June 2004.

| r_i | next hop | cost | seq |
|-------|----------|------|-----|
| 2.1 | 5 | 28.9 | 8 |
| 1 | 7 | 8.9 | 6 |
| 0.5 | 15 | 18.3 | 8 |
| 0.1 | 30 | .2 | 12 |

표 1 : 라우팅 테이블

4. 결론

본 논문은 무선 센서 네트워크에서 최소 파워 구성 방법을 이용하여 에너지를 효율적으로 사용하면서 네트워크의 수명을 늘리는 방안을 제시하였다. 최소파워 구성 방법을 이용하여 선택적 웨이트 컨트롤(Selective weight control) 알고리즘을 제안하여 네트워크 전체 수명을 연장시키고 지연(delay)문제를 해결한다. 이 알고리즘은 각 노드가 주기적으로 잔류에너지를 인접노드들과 공유하여 에너지 랭크 값을 유지한 상태에서 최소 에너지 경로를 사용하면서 에너지가 주위 노드들보다 작아질 때는 에너지가 많은 노드를 경로로 설정하여 특정 노드가 에너지 고갈되지 않고 네트워크내의 각 노드가 고르게 에너지를 소모하게 한다.

참고 문헌

[1] Volkan Rodoplu and Teresa H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks," IEEE J. Selected Areas in Communications, vol. 17(8), 1999.
 [2] Ram Ramanathan and Regina Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," in INFOCOM, 2000.
 [3] Guoliang Xing, YingZhang and Robert Pless, "Minimum Power configuration in Wireless Sensor Networks", in Mobihoc, 2005.