

무선 센서 네트워크에서 에너지 소모를 줄이기 위한 계층별 패킷모음 기법

정성영⁰, 김재훈
아주대학교 정보통신전문대학원
{inyoureyes98⁰, jaikim}@ajou.ac.kr

Hierarchical Packet Aggregation Scheme to Reduce Energy Consumption In Wireless Sensor Networks

Sung-Young Jung⁰, Jai-Hoon Kim
Graduate School of Information and Communication, Ajou University

요 약

무선 센서 네트워크에서 패킷모음 기법은 에너지 소모 문제를 개선하기 위한 연구주제 중 하나다. 현재 까지 연구된 패킷모음 기법에서는 중계노드들의 비효율적인 패킷전송이 존재한다. 본 논문에서 제안하는 기법은 센서노드의 위치에 따라 적절한 패킷모음을 함으로써 에너지 효율적으로 패킷을 전송하며, 싱크 노드와의 홉 수에 따라 계층별로 패킷을 전송하는 기법을 제안한다. 더불어 계층별 패킷전송을 위해 적합한 트리구성 방법도 소개한다. 성능분석을 통해 계층별로 패킷을 모음으로써 다른 기법들과 비슷한 수준의 전송지연을 가지면서 에너지 소모 측면에서 효율적임을 보인다.

1. 서론

최근 무선통신 및 전자공학의 발전은 소형으로 단거리 통신이 가능한 저비용, 저전력, 다기능 센서노드의 개발을 가능하게 하였다. 특히 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술의 발전은 소형화, 센서에 마이크로 프로세스 기능이 추가된 스마트 센서는 능동화, SAW(Surface Acoustic Wave) 기술을 이용한 IDT(Inter Digital Transducer) 센서는 소형화와 무선화를 동시에 가능하게 하였다 [1]. 이러한 전자기술의 발전에도 불구하고 센서노드는 여전히 에너지, 메모리, 컴퓨팅 능력 등 매우 제한적인 자원을 가진다. 특히 무선 센서노드들은 제한된 용량의 배터리를 통해 전력을 공급받는 특성 때문에 효율적 에너지 사용을 위한 기법들이 요구된다.

센서노드는 센싱, 데이터 처리, 통신 모듈로 구성되며, 센서노드의 에너지 소모 문제는 주로 이 세 측면에서 연구되고 있다. 센싱 측면에서는 노드 스케줄링 기법 연구 [2], 데이터 처리 측면에서는 운영체제 연구 [3], 통신 측면에서는 라우팅 및 MAC 프로토콜 연구 [4,5] 등이 활발히 진행되어 왔다.

일반적 센서 네트워크에서는 센싱이나 처리에 소모하는 에너지 보다 통신에서 소모하는 에너지가 상대적으로 크다. 따라서 통신에서 발생하는 에너지 소모를 줄임으로써 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 통신 과정에서 발생하는 에너지 소모를 줄이기 위한 방법으로 패킷모음 기법이 있다. 이는 여러 개의 패킷을 수신하여 각 패킷 속의 데이터를 하나의 패킷에 넣어 송신 함으로써 센서 네트워크의 부하를 감소 시킨다. 따라서 네트워크 전체적으로 볼 때 센서노드간 통신 횟수가 줄어들어 에너지 소모를 줄일 수 있다. 패킷모음 기법을 사용할 때에는 세가지 요소-패킷모음을 수행할 센서노드 결정, 패킷 기다림을 끝내기 위한 적절한 시점 결정, 패킷모음 노드가 기다려야 하는 패킷 수 결정-를 고려 함으로써 센서 네트워크의 전송 지연 문제와 에너지 소모 문제를 효율적으로 해결할 수 있다. 본 논문에서는 패킷모음 수행 시 발생할 수 있는 지연을 최소화 하고, 센서 네트워크의 트래픽을 줄임으로써 센서 네트워크의

수명연장 효과를 얻을 수 있는 기법을 제안한다.

2. 관련 연구

패킷모음 기법 중의 하나로 Data Funneling이 있다 [6]. 각 센서노드는 자신이 감지한 데이터를 개별적으로 목적지로 전송하는 것이 아니라, 특정 지역을 그룹으로 묶어 해당그룹 내의 센서들이 감지한 데이터는 경계노드에게 모아지고 이렇게 모은 데이터를 하나의 패킷으로 만들어 목적지로 전송하는 기법이다. 이 기법은 경계노드가 그룹 내의 데이터를 기다려 모음을 수행하여 보내는 면에서 효율적이지만, 그룹 내의 중계노드를 역시 약간의 데이터를 기다려서 모음수행 후 전송한다면, 그룹 내의 패킷전송 횟수가 줄고 에너지 소모가 줄어 에너지 효율을 더욱 증가시킬 수 있다.

데이터모음을 수행하는 센서노드의 패킷모음 종료 시점을 결정하여 해당시점에 모음된 패킷을 목적지로 전송하는 Cascading Timeouts 모델이 있다 [7]. 이 모델에서는 목적지에 가까운 센서노드일수록 센싱한 데이터 패킷을 전송하기 위해 많은 시간을 기다려야 하는 단점이 있다. 이 문제는 네트워크를 여러 개의 계층으로 분할해 계층별로 데이터 전송을 가능하게 함으로써 해결할 수 있다.

3. 제안기법

제안기법은 관련연구에서 설명한 Data Funneling 기법을 개선한다. 매번 특정 주기로 전송할 데이터를 발생하는 센서 네트워크가 있으며, 그룹 내에서 발생한 데이터를 하나의 경계노드로 모으는 과정에서 데이터를 중계해야 하는 센서노드들이 있다. 이들 중계 센서노드들은 자신이 감지한 데이터를 전송하고, 다른 센서가 전송한 데이터를 중계하기도 하기 때문에 한 번 이상의 전송이 발생한다. 일정량의 데이터가 경계노드에 수집 되어야만 하나의 패킷으로 데이터모음 하여 목적지를 향해 전송하기 때문에, 중계하는 센서노드들 역시 어느 정도 지연이 있어도 경계노드가 모음 패킷을 전송하는 시점은 동일할 수 있다. 그러므로 패킷을 중계하는 센서노드들도 데이터모음을 적절히 수행하여 전송한다면 기존과 동일한 지연을 가지면서 그룹 내 전송패킷 수의 감소로 인한 에너지 소모 효과를 가져올 수 있다.

서론에서 언급한 바와 같이, 패킷모음을 수행할 센서노드

* 본 연구는 정보통신연구진흥원의 국제공동연구 지원사업 및 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 정보통신부의 유비쿼터스컴퓨팅 및 네트워크원천기술개발사업의 지원에 의한 것임

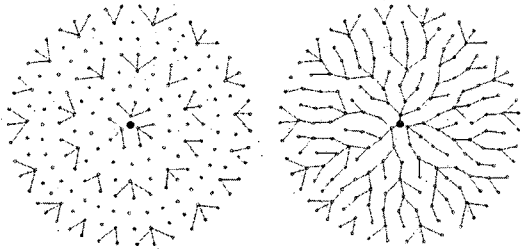
결정, 패킷 기다림을 끝내기 위한 적절한 시점 결정, 패킷모음 노드가 기다려야 하는 패킷 수 결정은 센서노드의 패킷전송 지연 문제와 에너지 소모 문제에 영향을 미친다. 제안기법에서는 패킷 전송횟수를 최소화 하기 위해 트리구조의 센서 네트워크에서 잎 노드(leaf node) 이외의 모든 센서노드가 패킷모음을 수행한다. 트리구조의 센서 네트워크에서 센서노드의 위치에 따라 패킷 기다림을 끝내는 시점이 결정된다. 제안기법에서 패킷모음 노드가 기다려야 하는 패킷 수는 트리구조에서 결정된 패킷 기다림을 끝내는 시점에 종속적이기 때문에 영두에 두지 않는다.

제안기법은 모음될 데이터의 총 크기를 영두에 두고 트리를 구성한다. 예를 들어 Mica2의 TinyOS의 표준 데이터 크기는 29바이트이다. 따라서 모음될 데이터의 총 크기는 29바이트를 초과하지 못한다. 따라서 센싱한 데이터의 크기를 2바이트라고 가정한다면 14개의 데이터를 하나의 패킷으로 모음할 수 있다. 센서노드가 일정한 밀도로 분포한다면, 제안기법으로 구성된 한 서브트리에는 루트노드의 자손 노드가 평균 10~11개 존재하므로 서브트리의 루트노드에서 하나의 패킷으로 모음될 수 있다.

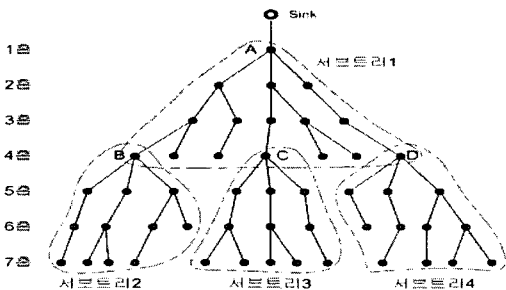
3.1 트리구성

싱크 노드는 센서 네트워크 전체로 SET_TREE 메시지를 브로드 캐스트 한다. SET_TREE 메시지를 받은 센서노드는 이 메시지 속에 포함된 흡 수를 바탕으로 자신의 흡 수를 알 수 있으며, 여러 개의 SET_TREE 메시지를 받았다면 최소 흡 수를 자신의 흡 수로 유지한다. SET_TREE 메시지를 받은 후 특정 시간이 지나면, $3n+2$ 흡 노드는 $3n+1$ (n 은 0 이상의 정수) 흡 노드와의 교섭을 통해 $3n+2$ 흡 노드 3개가 $3n+1$ 흡 노드의 자식이 되도록 경로를 설정한다. 자식 노드 3개를 갖는 것이 불가능하다면 2개나 1개도 허용된다. 이렇게 하여 설정된 경로의 모습이 <그림 1-a>에 나타나 있다.

$3n+1$ 흡 노드와 $3n+2$ 흡 노드와의 경로 설정이 끝나면, $3n+2$ 흡 노드는 $3n+3$ 흡 노드와의 교섭을 시작한다. 이 때는 $3n+2$



(a) $3n+1$ 흡과 $3n+2$ 흡 노드간 교섭 후 경로 (b) 모든 노드가 교섭 후 완성된 트리 <그림 1>



<그림 2> 제안기법으로 구성된 센서 네트워크 트리

흡 노드는 최대 2개의 자식 노드만 갖도록 한다. $3n+3$ 흡 노드도 마찬가지로 방법으로 $3n+4$ 흡 노드와 교섭하여 최대 2개의 자식 노드를 선택하면 트리구성이 끝나게 된다. 이 방식을 적용하여 만든 트리구조의 센서 네트워크가 <그림 1-b>에 나타나 있다.

<그림 2>는 제안기법을 적용해서 구성될 수 있는 트리의 예이다. 그림에서 3 흡 깊이의 4개의 서브트리가 있으며, 해당 트리의 루트인 A, B, C, D 노드가 있다. <그림 2>의 트리구조에서 주목해야 할 사항은 3 흡 단위로 자식 노드 수에 제한이 있다는 점이다. 즉, $3n+1$ (1과 4) 흡 노드 중 잎 노드가 아닌 노드(각 서브트리의 루트노드)의 자식 수는 모두 3개이다. 이는 트리구성 과정에서 가능한 최대 3개까지 자식 노드를 갖도록 구성하기 때문이다. 마찬가지로 $3n+2$ (2와 5) 흡과 $3n+3$ (3과 6) 흡에 해당하는 노드들은 최대 2개까지 자식 노드를 갖는다. 이렇게 흡 수에 따라 자식노드를 가질 수 있는 한계를 정함으로써 3 흡 단위의 계층별 패킷전송이 가능하다. 즉, 패킷 하나를 전송하는데 걸리는 시간을 d 라고 한다면, 각 서브트리의 최하위 노드인 $3n+4$ 흡 노드의 모든 데이터를 부모 노드인 $3n+3$ 흡 노드에게 전송하는데 최대 $2d$ 의 시간이 소모된다. 같은 방법으로, $3n+3$ 흡 노드에서 $3n+2$ 흡인 노드까지 전송하는데 최대 $2d$, $3n+2$ 흡 노드에서 $3n+1$ 흡 노드까지 전송하는데 최대 $3d$ 의 시간이 소모된다. 결국 한 서브트리 내의 모든 데이터가 서브트리의 루트까지 전달되는데 최대 $7d$ 의 시간이 소모된다. 각 서브트리에서 발생한 데이터는 $7d$ 시간에 각 서브트리의 루트노드로 모이며 MTU(Maximum Transmission Unit) 한도 내에서 최대한 모음된 상태로 서브트리를 떠나 목적지인 싱크노드로 전송된다. 앞서 언급했듯이 데이터 크기를 2바이트라 가정하면 Mica2에서 각 서브트리마다 루트에 모음되어 싱크 노드에게 전송하는 패킷은 1개이다. 즉 <그림 2>에서 $7d$ 시간 후에 네트워크에 존재하는 패킷은 A, B, C, D 노드가 가진 4개의 패킷이 전부이다. 이렇게 해서 $7d$ 시간 이후의 패킷의 수는 최초 패킷의 약 1/10 수준으로 감소 함으로써 센서 네트워크의 전송으로 인한 에너지 소모를 줄일 수 있다.

3.2 센싱 데이터 전송

모든 센서노드는 동기화 되어 있으며 시간 T를 주기로 정보를 센싱하여 전송할 패킷을 발생시키며 서브트리 내에서 잎 노드를 제외한 모든 노드는 패킷모음을 한다고 가정한다. 각 센서노드는 전송할 패킷이 발생한 후 자신의 흡 수에 따라 패킷전송을 위해 기다리는 시간이 정해진다. 앞서 설명에서 알 수 있듯이 $3n+3$ 흡 노드는 $2d$, $3n+2$ 흡 노드는 $4d$, $3n+1$ 흡 노드는 $7d$ 를 기다린다. 루트노드가 아닌 노드는 자신 노드로부터 받은 데이터와 자신이 센싱한 데이터를 모음하여 전송하며, 루트노드는 자신이 센싱한 데이터는 이미 전송하였고 자손노드로부터 받은 데이터를 모음하여 싱크노드에게 전송한다.

4. 성능분석

센서 네트워크는 완전 이진트리며, 각 서브트리 내의 모든 패킷은 각 서브트리의 루트노드에서 하나의 패킷으로 모음된다고 가정한다. 3가지 기법(제안기법, 패킷모음을 하지 않는 기법, Data Funneling(서브트리의 루트노드만 패킷모음을 하는 기법))에서 총 전송지연 및 에너지 소모를 비교한다.

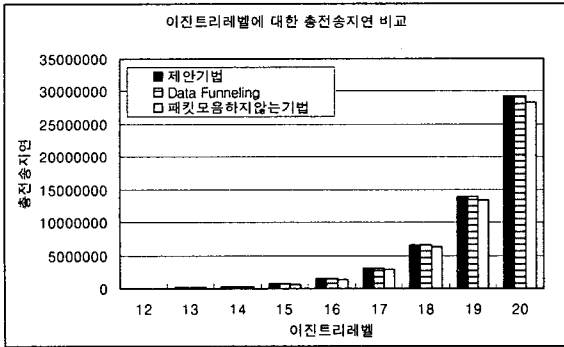
4.1 총 전송지연

센서 네트워크 내의 각 센서노드는 패킷모음을 위해 일정시간을 대기한다. 완전 이진트리의 레벨 n에 해당하는 센서노드들이 센서 네트워크의 루트노드까지 데이터를 전송하는데 요구되는 지연을 D_n 이라 하고, 완전 이진트리의 모든 레벨의 지연의 총합을 총 전송지연 D_t 라 하면, D_n, D_t 는 다음의 (1), (2)의 수식으로 나타낼 수 있다. 센서 노드가 속하는 서브트리의 루트노드의 레벨을 L이라 하면, $L = n - \{(n+1) \bmod 3 + 1\}$ 이며, D_n 은 다음과 같다.

$$D_n = \begin{cases} (4n - L - 3) \times 2^{n-2} d & (2 \leq n \leq 4) \\ (4n - L - 3) \times 2^{L-1} d & (n \geq 5) \end{cases} \quad (1)$$

식(1)을 이용하여 총 전송지연 D_t 를 구하면 식(2)과 같다.

$$D_t = \sum_{k=2}^n D_k \quad (2)$$



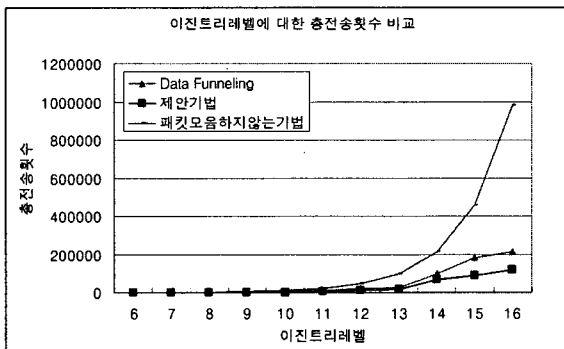
<그림 3> 이진트리 레벨에 대한 총 전송지연 비교

<그림 3>은 (2)의 수식을 적용하여 제안기법, 패킷모음을 하지 않는 기법, Data Funneling 기법에서의 총 전송지연을 비교한 것이다. 제안기법은 Data Funneling 기법의 총 전송지연과는 거의 같으며, 패킷모음을 하지 않는 기법의 총 전송지연보다는 소폭 큰 정도임을 알 수 있다. 즉, 제안기법은 패킷모음을 함으로써 추가로 발생하는 지연이 거의 없음을 알 수 있다.

4.2 에너지 소모

패킷 전송횟수에 비례하여 에너지 소모도 증가하므로 패킷 전송횟수로 에너지 소모를 비교한다. 완전 이진트리에서 1 홉, 4 홉, 7 홉, ... 에 해당하는 모든 노드가 서브트리의 루트노드가 되며, 각 서브트리 내에서 발생한 모든 데이터는 루트노드에서 모음하여 하나의 패킷으로 만들고 이 패킷은 상크 노드에게 전송 된다. 완전 이진트리의 레벨이 n 이라면 총 패킷전송 횟수 N_{tr} 은 수식 (3)으로 표현된다.

$$N_{tr} = 2^n - 1 + \sum_{x=2}^n \left(3 \left\lfloor \frac{x-2}{3} \right\rfloor + 1 \right) \times 2^{3 \left\lfloor \frac{x-2}{3} \right\rfloor} \quad (3)$$



<그림 4> 이진트리 레벨에 대한 총 전송횟수 비교

<그림 4>는 (3)의 수식을 적용하여 제안기법, 패킷모음을 하지 않는 기법, Data Funneling 기법에서의 총 전송횟수를 비교한 것이다. 제안기법은 Data Funneling 기법 및 패킷모음을 하지 않는 기법과 비교할 때 총 전송횟수가 가장 작음을 알 수 있다. 특히 다른 기법들에 비해 이진트리 레벨증가에 따른 총 전송횟수 증가 폭이 가장 작으므로 센서 네트워크의 크기가 커질수록 제안기법이 에너지 소모 측면에서 유리함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 센서 네트워크를 계층별로 분할하여 패킷을 전송하는 기법을 제안 하였다. 제안기법에서 각 센서노드는 트리구조의 센서네트워크에서 자신의 위치에 따라 일정시간을 패킷모음을 위해 대기한 후 패킷을 전송한다. 패킷모음의 결과로 센서 네트워크 내의 트래픽은 상당히 감소함을 알 수 있었다. 제안기법에서 트래픽은 약 1/10 수준으로 감소하였다. Data Funneling 기법 및 패킷모음을 하지 않는 기법과 비교 결과, 제안기법은 센서 네트워크의 규모가 커지면 총 전송지연은 거의 유사한 수준이거나 소폭 증가함을 알 수 있었다. 하지만 센서 네트워크 규모가 커짐에 따른 전송횟수 증가는 다른 기법들에 비해 훨씬 작았다. 결과적으로 제안기법은 소폭의 전송지연 증가를 가지면서 큰 에너지 절약효과를 기대할 수 있어 전송지연 대비 에너지 효율 측면에서 상당히 우수함을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

- [1] 허재두, 박광로, "유비쿼터스 홈을 위한 홈 네트워크 기술," 정보처리학회지 제11권 3호(2004.5).
- [2] D. Tian and N. D. Georganas, "A Node Scheduling Scheme for Energy Conservation in Large Wireless Sensor Networks," Wireless Communications and Mobile Computing Journal, May 2003.
- [3] Simon Han, Ramkumar Rengaswamy, Roy S Shea, Eddie Kohler, Mani B Srivastava, "A Dynamic Operating System for Sensor Nodes," Third International Conference on Mobile Systems, Applications and Services(Mobisys) , June 2005.
- [4] C. Intanagonwivat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks," In Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). ACM, August 2000.
- [5] W. Heinzelman, J. Kulik and H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," in Proceedins of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), August 1999.
- [6] D. Petrovic, R. C. Shah, K. Ramchandran, and J.Rabaey, "Data Funneling: Routing with Aggregation and Compression for Wireless Sensor Networks," In Proceedings of First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, May 2003.
- [7] I. Solis and K. Obraczka, "The Impact of Timing in Data Aggregation for Sensor Networks," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), Vol. 6, June 2004.