

멀티-홉 센서 네트워크 저전력 MAC 설계

Energy efficient Medium Access Control for multi-hop sensor network

강 정 훈*, 이 민 구*, 박 병 하*, 유 준 재**

* 전자부품연구원, 디지털미디어 연구센터

(전화:(031)780-7039, 팩스:(013)780-7060, E-mail : {budge,emingoo,bhpark}@keti.re.kr)

** 전자부품연구원, 유비쿼터스 컴퓨팅 연구센터(전화:(031)780-7019, 팩스:(013)780-7060, E-mail : yoojj@keti.re.kr)

Abstract : This paper proposes a medium-access control(MAC) protocol designed for wireless multi-hop sensor networks which is used for connecting physical world and cyber computing space. Wireless multi-hop sensor networks use battery-operated computing and sensing device. We expect sensor networks to be deployed in an ad hoc fashion, with nodes remaining inactive for long time, but becoming suddenly active when specific event is detected. These characteristics of multi-hop sensor networks and applications motivate a MAC that is different from traditional wireless MACs about power conservation scheme, such as IEEE 802.11. Proposed MAC uses a few techniques to reduce energy consumption. Result show that proposed MAC obtains more energy savings.

Keywords : sensor, network, multi-hop, ubiquitous computing

1. 서 론

센서 네트워크(sensor network)는 물리공간의 상태인 빛, 소리, 온도, 움직임 같은 물리적 데이터를 무선 통신이 가능한 센서노드에서 감지하고 측정하여 중앙의 기본 노드(base-station or sink)로 전달하기 위해 센서 노드들로 구성되는 네트워크이다. 센서 네트워크는 일반적으로 멀티-홉(multi-hop) 무선 네트워크 형태의 많은 분산 센서 노드들로 구성된다. 센서 노드들은 하나이상의 센서(온도, 소리, 빛, 가속도, 자기장 등), 액추에이터(actuator), 마이크로 컨트롤러, 수 십 KB 크기의 EEPROM, 수 KB의 SRAM, 수백 KB 크기의 플래시 메모리, 근거리 통신 모듈로 구성된다. 센서 네트워크 기술은 센서와 무선통신 기능을 이용하여 물리공간에서 측정된 아날로그 데이터를 디지털 신호로 변환하고, 인터넷 같은 전자공간에 연결된 기본 노드로 전달하는 입력시스템의 역할을 한다. 물리적 세계와 사이버 세계를 연결할 수 있는 특징 때문에, 센서 네트워크의 개념은 새롭게 대두되고 있는 지능형 서비스들의 지능형 환경 모니터링, 위치인지 서비스, 지능형 의료시스템, 지능형 로봇 시스템 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

센서 네트워크 환경에서는 많은 수의 센서 노드들이 동시에 무선 통신을 시도하기 때문에, 통신 성능을 좌우하는 Medium Access Control(MAC)이 주요 사항으로 고려되어야 한다. 무선 센서 네트워크용 MAC 프로토콜은 특히 에너지 소비를 줄일 수 있는 특성이 필수

로 요구된다. 센서 노드들은 주로 배터리 전원을 이용하고, 센서 노드의 배터리 충전이 어렵기 때문에 센서 노드들의 동작 수명을 최대한 길게 하는 것이 중요하기 때문이다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에 적합하도록 에너지 소모를 줄일 수 있는 MAC 설계 기법을 제안한다. 본 기술은 에너지 소비를 최소화 하는데 목적을 두고 설계 되었고, idle listening을 최소화 하여 에너지 효율성을 높였으며, 이로 인해 발생하는 전송 지연 시간을 줄일 수 있는 기법을 제안한다.

II. 관련 기술 동향

MAC은 유무선 네트워크 전반에 걸쳐 다양한 기법들이 제안되고 있다. 무선 센서 네트워크에 적용 가능한 MAC 프로토콜로는 TDMA와 IEEE 802.11 방식을 들 수 있는데, IEEE 802.11은 무선 네트워크에서 발생할 수 있는 hidden terminal 문제를 해결한 기술로 무선 애드혹(ad-hoc) 네트워크에 사용하기 위해 제안되었다. 이 기법은 센서 노드의 가장 큰 요소인 에너지 소모 절약에는 적절하지 않은 프로토콜이다. TDMA(Time Division Multiple Access)기법은 IEEE 802.11 기법과 비교하여 에너지 절약에는 강점을 가졌으나, 통신 클러스터(cluster)를 형성하기가 어렵다. 그리고 클러스터 간 통신과 간섭을 관리하기에는 많은 처리 동작이 필요하기 때문에 센서 네트워크에 사용되는 것은 어렵다.

현재 상용화되어 있는 센서 네트워크 제품들은 대부분 CSMA(Carrier Sense Medium Access)를 이용하여 시스템 오버헤드가 적은 MAC기술을 사용하고 있다 [3][4][7].

III. 저전력 멀티-홉 센서 네트워크용 MAC 설계

본 논문에서 제안하는 MAC 설계의 목표는 에너지의 소모를 최소화하는 것이다. 본 논문에서 제안한 MAC은 에너지 소비를 줄이기 위해서 센서 노드의 상태가 주기적으로 listen / sleep으로 변경되도록 하였고, 과도 수신 상태를 제거하며, sleep 상태 때문에 발생하는 전송 지연시간을 줄일 수 있는 기법을 제안한다.

1. 무선 센서 네트워크 특징

센서 네트워크는 기존의 IP 네트워크나 애드혹 네트워크와는 차이가 존재한다. 센서 네트워크는 애드혹 형태이며 다수의 센서 노드들로 구성된다. 에너지 절약을 위해서 각 노드들은 짧은 거리 무선 통신 인터페이스를 가지고 있으며, 대부분 통신이 노드 간에 직접 통신하는 형태로 일어나게 된다. 또한 센서 네트워크는 특정 응용 서비스를 목적으로 구성되며, 시스템 응용 서비스 자체의 성능을 높이는 것에 목적을 두도록 설계한다. 센서 네트워크에서 센서 노드 간 통신에서 데이터는 송신, 저장, 전달의 순서로 전송되며, 이에 따라 전체적인 전송 시간의 지연을 발생 시킬 수 있다. 결국 최종응용 서비스에서는 데이터가 수신되기 까지 장시간의 idle 시간을 가지게 되며, 전송 중 발생하는 지연시간은 허용하도록 설계된다. 센서 네트워크의 환경감지, 모니터링 응용에서의 이벤트는 긴 시간을 주기로 발생하기 때문에 전송 중에 발생하는 약간의 지연시간 보다는 응용 서비스를 오랫동안 지속 시킬 수 있는 센서 노드의 수명 자체가 더 중요한 요소이다[5].

2. 주기적인 listen / sleep 상태 변경

위에서 언급한 바와 같이 대부분의 센서 네트워크 응용에서, 센서 노드들은 오랜 시간동안 이벤트가 발생하지 않는 idle 상태에 머물면서 전송되는 데이터를 기다리게 된다. 이러한 idle 상태 구간이 길기 때문에 에너지 소모를 줄이기 위해서 센서 노드들을 항상 listen 상태에 두지 않고 sleep 상태로 유지시키는 것이 에너지 소모를 최소화할 수 있다. 본 논문에서는 센서 노드가 일정 주기로 sleep 상태로 변경 되도록 설계하였다.

각 센서 노드들은 idle 상태에서 특정 시간이 지난 후, sleep 상태로 변경되며, 다른 센서 노드와 통신은 listen상태에 가능하다. Sleep 구간 동안 센서 노드는 통신 모듈의 전원을 끄고, 일정 시간이 지나면 listen 상태로 변경한다. Listen과 sleep 시간은 응용 서비스의 특징에 따라 달라져야 한다. 본 논문에서는 각 노

드들 간의 상태 변경의 시간적 편차를 줄이기 위해, 주기적으로 이웃 노드들 간 동기화가 이루어지도록 설계하였고, 동기화 에러를 줄이기 위하여 listen 구간은 클럭 편차보다 길게 설정하였다. 매우 짧은 time slot을 가지는 TDMA와 달리 본 논문에서는 이웃 노드 간 동기화에 여유 있는 동기화기술을 사용하였다[5].

모든 센서 노드들은 기본 노드에서 전송하는 동기화 신호에 따라 자신의 listen / sleep 스케줄을 설정한다. 모든 센서 노드들이 동시에 listen 상태와 sleep 상태로 전이 하도록 하여, 멀티-홉 센서 네트워크 환경에서 주변 노드들 간의 동기화가 이루어지도록 구성하였다. 기본 센서 노드는 자신의 스케줄을 현재 구성된 센서 네트워크에 브로드캐스트(broadcast)하여, 다른 센서 노드들과 listen / sleep 스케줄의 동기를 맞춘다. 만약 여러 이웃 노드들이 동시에 통신하고자 할 경우 미디어(media)에 대한 경쟁이 일어나는데, 이때 CSMA(Carrier Sense Medium Access) 기법으로 전송 충돌을 피하게 된다. 일정 시간동안 전송중인 데이터의 유무를 파악하여 전송중인 데이터가 있다면, 임의의 시간동안 기다린 후 다시 전송을 시도하게 되고 전송중인 데이터가 없으면 데이터 전송이 시작되며 전송이 끝날 때 까지 sleep 상태로 변경되지 않는다[3][4].

3. Energy efficient multi-hop MAC protocol

Idle Listening 구간에서 발생하는 에너지 소비를 줄이기 위해, Listen과 sleep상태를 주기적으로 반복하여 센서 노드에서 소비되는 전력을 줄일 수 있지만, 데이터 전송 시점에서 송, 수신 센서 노드의 상태가 sleep이면 즉시 데이터 전송을 하지 못하고, 전송 가능한 상태로 변경될 때 까지 전송이 지연된다[5]. 센서 노드의 수가 많은 센서 네트워크 환경에서 데이터 전송은 다수의 센서 노드를 거쳐서 전달되기 때문에 전송 지연시간이 누적되어 발생하게 된다.

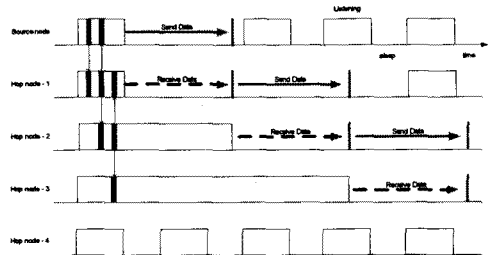


그림 1. 변형된 listen / sleep 기법
Fig. 1. Modified listen / sleep duty cycle

일반적으로 네트워크 환경에서는 데이터 전송 중 발생하는 지연시간을 최소화 시켜야 한다. 에너지 소비를 줄이기 위한 listen / sleep 기법의 단점인 데이터 전송 지연시간을 줄이기 위해, 짧은 길이의 컨트를 정보를 이용하여 데이터 전송 시작을 이웃 센서 노드에

게 알리고, 이 컨트롤 신호를 수신한 센서 노드는 곧 전송될 데이터를 수신하기 위해 sleep 상태로 변경되지 않도록 한다.

제안한 기법은 센서를 통해 이벤트가 발생하면, 이벤트가 발생한 센서 노드에서부터 데이터가 전송되는 동안 전달되는 센서 노드들과 최종 도착 지점인 기본 센서 노드에게까지 적용된다. 이벤트가 발생하면 센서 노드는 데이터를 전송하기 위해서, 먼저 컨트롤 정보를 브로드캐스트 한다. 이 컨트롤 정보를 수신한 첫 번째 홉 센서 노드는 sleep 상태로 변경되지 않도록 스케줄을 변경하고, 동시에 컨트롤 정보를 수신했음을 다시 브로드캐스트 한다. 이 순간에는 이벤트가 발생한 센서 노드와 두 번째 홉 센서 노드가 컨트롤 정보를 수신한다. 이어서 이벤트가 발생한 센서 노드는 데이터를 첫 번째 홉 센서 노드에 전송한다. 두 번째 홉 센서 노드도 컨트롤 정보를 수신할 때 sleep 상태로 변경되지 않도록 스케줄을 변경한다. 첫 번째 홉 센서 노드는 데이터 수신이 끝나면, 즉시 두 번째 홉 센서 노드로 데이터를 전송한다. 같은 방법으로 두 번째 홉 센서 노드에서 세 번째 홉 센서 노드로 데이터를 전송한다. 네 번째 홉 센서 노드로 전송할 때는 이벤트가 발생한 센서 노드와 같은 방법으로 데이터를 전송한다. 그림 1은 4번의 홉 환경에서 데이터의 전송을 시간에 따라 나타낸 것이다.

4. 과도 수신 상태

IEEE 802.11에서는 효율적인 성능을 위해서 모든 이웃 노드들이 전송중인 데이터에 대해 listening을 수행한다. 결과적으로 이것은 노드들의 에너지 소비를 증대시키는 결과를 가져오며, 특히 노드간 밀집도가 높을 때는 트래픽과 에너지소모가 증가되므로, 이런 방식은 센서 네트워크 환경에서는 부적절하다.

위에서 제안한 listen / sleep 상태 전이 방식에서는 전송을 시작하는 센서노드에서부터 다음 세 번째 홉 센서노드 까지 sleep 상태로 전이하지 않도록 하여, 데이터 전달시간을 줄인다. 이 방법은 두 번째, 세 번째 센서 노드가 데이터 수신과 상관없는 시기에 listen 상태를 유지하기 때문에 에너지 소모에 비효율적이다.

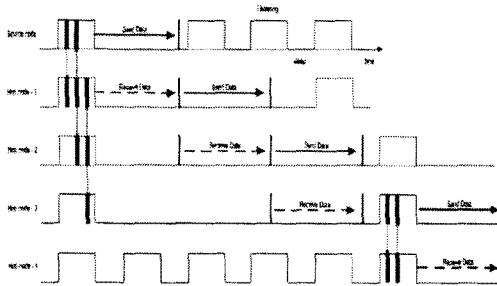


그림 2. 과도 listen 상태를 제거

Fig. 2. Over-listening removed duty cycle

전송하는 데이터 패킷의 길이가 일정할 경우, 각 센서 노드에서는 자신이 동작해야 하는 시간을 예측할 수 있게 된다. 총 3개의 컨트롤 신호의 수신 시간을 측정하여 자신이 총 4개의 단위로 구성된 멀티-홉 네트워크에서 자신의 홉 위치를 파악하며, 이에 따라 자신의 listening / sleep 스케줄을 조정한다.

5. 전송 지연시간

n번째 홉의 센서 노드에서 발생하는 CSMA 지연시간을 $t_{cs,n}$, 데이터 전송 시간에 소요되는 시간을 t_{tx} , 다음 센서 노드로 데이터를 전송중 발생하는 sleep 상태로 인한 지연시간을 $t_{s,n}$ 이라하고 하면, 센서 노드가 5개가 있고, 1 번째 센서 노드에서 5번째 노드까지 멀티-홉으로 데이터가 전달되는 동안 발생하는 지연시간은

$$D_n = t_{s,n} + t_{cs,n} + t_{tx} \quad (1)$$

이라 할 수 있으며, 각 센서 노드 간 단위 전송시간 T_f 를 아래와 같이 가정하면, 지연시간은 수식(3)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_f = t_{cs,n-1} + t_{tx} + t_{s,n} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} D(N) &= D_1 + \sum_{n=2}^N D_n \\ &= t_{s,1} + (N-1)T_f + t_{cs,N} - t_{tx} \end{aligned} \quad (3)$$

주기적 listen / sleep 상태 변화의 환경에서는 홉의 수 N 이 증가함에 따라 지연시간이 T_f 의 비율로 증가함을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 기법을 사용하여 5개의 센서 노드 상에서 데이터를 전송시키는 경우, T_f 는

$$T_f = t_{cs,n} + t_{tx} + t_{cs,n+1} + t_{tx} + t_{cs,n+2} + t_{tx} + t_{s,n+3} \quad (4)$$

으로 변경되며, 이에 따라 지연시간은

$$\begin{aligned} D(N) &= t_{s,1} + t_{cs,1} + t_{tx} + t_{cs,1} + t_{tx} + t_{cs,1} + t_{tx} + t_{s,4} \\ &\quad \dots + t_{cs,N-1} + t_{tx} + t_{cs,N} + t_{tx} \\ D(N) &= t_{s,1} + (N/3)T_f + t_{cs,N-1} + t_{cs,N} + 2t_{tx} \end{aligned} \quad (5)$$

이다.

이 경우 홉의 수 N 이 증가함에 따라 전체 지연시간이 $T_f / 3$ 의 비율로 증가하는데, 일반적인 기법보다 지연시간이 짧아진다.

IV. 결 론

논문에서는 유비쿼터스 컴퓨팅 환경에서 물리 공간의 이벤트를 입력받는 센서 노드들의 소모전력을 최소화하기 위한 방법으로, 지연시간을 줄일 수 있는 무선 통신모듈 listen / sleep 상태 전이기법과 과도 수신을 제거하여 기법을 이용하여 MAC을 설계하였다. 그리고 MAC의 에너지 소모를 측정하기 위해 멀티-홉 환경에서 실험을 하였다. 이를 이용하여 무선 센서 노드의 에너지 소비를 약 30% 정도 줄일 수 있었다. 무선 센서 노드의 통신 모듈은 노드가 사용하는 전체 전력의 20-60%를 차지한다[6]. 제안한 기법을 이용하면 멀티-홉 네트워크 무선 센서노드 통신모듈의 소비전력을 줄일 수 있어 센서 노드의 전력 소모를 개선할 수 있다.

멀티-홉 센서 네트워크 환경은 목표로 하는 응용 서비스에 따라 다양한 네트워크 구성과 통신환경으로 변하기 때문에, 센서 노드간의 거리, 비활성화 주기 및 스케줄 동기화, 전송 충돌에 의한 데이터 손실, 데이터 전송 간격, 네트워크 품질, 전송 통보 컨트롤 패킷수 등을 고려한 연구가 추가적으로 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] TinyOS Website, <http://www.tinyos.net>.
- [2] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, D. Culler, S. Hollar, K. Pister. "System Architecture Directions for Networked Sensors." In ASPLOS-IX , 11/00.
- [3] Nelson Lee, Philip Levis, Jason Hill. "Mica High Speed Radio Stack.", TinyOS tutorial.
- [4] Alec Woo, David Culler. "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks." Mobicom 2001, 221-235
- [5] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks." In Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), New York, NY, USA, June, 2002.
- [6] J. Hill, D. Culler, "A wireless-embedded Architecture for System Level Optimization," UC Berkeley Technical Report, March 2002.
- [7] CrossBow Website, <http://www.xbow.com>