
무선 센서망의 에너지 효율적 MAC(S-MAC/T-MAC) 성능 분석

이우철* · 이유태 · 김동일

동의대학교

Analysis of the S-MAC/T-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

Woo-Chul Lee* · Yoo-Tae Lee · Dong-il Kim

Dong-Eui University

E-mail : adhoc@deu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 무선 센서망에서 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 효율적인 설계에 대해 살펴보고 그중 S(Sensor)-MAC과 T(Time-out)-MAC에 대해 자세히 고찰한다. S-MAC은 listen/sleep의 주기를 사용한다. 이것은 데이터가 전송될 때 store-and-forward 기법이 필요한 센서 네트워크의 어플리케이션의 충돌을 줄일 수 있다. 그러나 이렇게 고정되어진 duration field를 가진 S-MAC과는 상이하게 T-MAC은 적응적인 duty cycle을 제공한다. 이는 수신되어질 메시지를 잠재적으로 기다려야 하는 idle 상태에서의 에너지 소비를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 두 가지 MAC 프로토콜을 OMNeT++ 시뮬레이션 환경에서 실험하여 latency, throughput, 전력 소비의 측면에서 각각 비교함으로써 그 효율성을 증명하였다.

ABSTRACT

In this paper, we focus on the problem of designing an energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks and analyze S(Sensor)-MAC and T(Time-out)-MAC. S-MAC is based on the concept of the 'listen/sleep mode cycle'. This applies message passing to reduce contention latency for sensor-network applications that require store-and-forward processing as data moves through the network. However unlike the S-MAC, where the duration of the cycle is fixed, T-MAC introduces an adaptive duty cycle in a novel way: by dynamical ending the active part of it. This reduces the amount of energy wasted on idle listening, in which nodes wait for potentially incoming messages while still maintaining a reasonable throughput. In this paper we discuss the design of these two Protocols. We analyze them from the aspect of latency, throughput, and power savings when using the OMNeT++ simulator in various environments.

키워드

Sensor, MAC protocol, Energy efficiency, S-MAC, T-MAC

1. 서 론

대규모의 다양한 센서 네트워크를 배포 및 관리하는 것은 단순하게 센서 디바이스를 구성하는 것 이상의 기술을 요구한다. 따라서 실제 센서 네트워크 컴퓨팅의 실현에는 많은 어려움이 따른다.

현재 센싱 기능과 컴퓨팅 기능을 가지는 센서 노드들을 무선 네트워크로 연결하는 센서 네트워크 기술이 전 세계적으로 많은 관심을 끌고 있다.

센서 노드는 다른 노드들과 Ad-hoc 네트워크를 구성하고 이러한 네트워크를 기반으로 상호 협력하여 데이터를 수집하고 가공할 수 있다. 점차 센서 장치는 더욱더 작아질 것이며 미세한 진동 등과 같은 주위환경을 통해서도 에너지를 공급받을 수 있으며, 집안이나 빌딩 등에 존재하는 다른 장치나 기존의 네트워크에 연결되게 될 것이다. 하지만 현재 센서노드의 배터리 기술은 아직 기대에 미치지 못하고 있기 때문에, 에너지를 소비를

줄일 수 있는 대체 방안으로, 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 더 많은 관심이 있다.

무선 센서 네트워크에서 통신 에너지 소비는 중요한 이슈이며, 망의 효율적 운용에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서 기존의 프로토콜들은 이러한 관점에서 보면 부적절하게 설계되어 있다. 통신 모듈에서의 에너지 소비는 실제 데이터 프레임전송 시에만 발생하는 것이 아니라, 충돌을 방지하기 위한 사전 전송 매체(Transmission medium) 감시를 위해서도 상당한 양의 에너지가 소모된다. 그렇기 때문에 전송하거나 받을 데이터가 존재하지 않을 때는 적절한 통신 모듈의 에너지 소모를 줄여 불필요한 전력낭비를 최소화 할 수 있는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜 설계가 시급하다. 무선 네트워크 환경에서 에너지소비를 유발하는 주요 요인은 Collision, Overhearing, Control packet overhead, Idle listening 등이 있는데 이러한 요인들 중 가장 심각한 에너지 소비를 유발하는 것은 idle listening으로 전체 통신 에너지 소비의 약 50~100%를 차지한다. 무선 센서 네트워크의 라이프 타임을 늘리기 위해서는 궁극적으로 idle listening 문제를 해결할 수 있는 에너지 효율적 MAC 프로토콜의 설계가 중요하다는 것을 알 수 있다.

II. 본 론

1 S-MAC

S-MAC은 에너지 효율성을 극대화하기 위해 센서 통신 모듈의 Listen/Sleep 상태를 일정한 주기로 반복하는 CSMA/CA 기반의 MAC 프로토콜이다. 각각의 센서 노드는 "Listen 상태 주기"에서 동기화 및 송수신할 데이터의 존재 유무를 확인하게 되는 반면, "Sleep 상태 주기"에서는 송수신 데이터 존재 여부에 따라 통신 모듈의 On/Off상태를 결정하게 된다. 즉, 센서 노드는 Listen 주기 동안 SYNC 제어 패킷을 통해 다른 노드들과의 동기(Synchronization)를 맞추는 한편, RTS/CTS 패킷교환을 통해 뒤이은 Sleep 주기 동안 자신에 의한 송신 혹은 자신을 위한 수신 데이터가 존재하는지 여부를 확인한다. 만약 존재한다면 자신이 데이터 교환에 직접 참여해야 한다는 것을 의미하므로 sleep 주기에도 계속 On 상태여야 하지만, 그렇지 않은 경우에는 통신 모듈을 Off 함으로써 에너지 소모를 줄일 수 있다. 결국 이러한 Listen/Sleep 주기를 반복적으로 수행함으로써 불필요한 idle listening 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

S-MAC은 collision, overhearing, idle listening, overhead로 인한 에너지 소비를 줄이기 위한 몇 가지 대안을 제시하고 있는데, 주기적인 Sleep/Listen, Collision avoidance, Overhearing

avoidance, Message passing이 그것이다.

1.1 Collision Avoidance

멀티홉망에서 둘 이상의 송신 노드들로 부터의 데이터 전송은 충돌을 야기할 수 있는데, S-MAC은 RTS/CTS 교환기법을 사용하는데 이는 hidden terminal 문제를 해결하기 위해서와 충돌을 막기 위해서이다. 이러한 기법은 물리적 반송파 감지와 가상 반송파 감지로 나누어진다.

각 전송되어지는 패킷에는 총 전송시간을 말해주는 duration field가 있어서 만약 노드들이 다른 노드들로부터 패킷을 수신하면 얼마나 오랫동안 sleep 모드로 들어가야만 하는지를 알 수 있다. 노드들은 이러한 수치들을 NAV(Network Allocation Vector)에 기록을 하고 타이머를 동작시킨다. 이 기법은 virtual carrier sensing 이라고 불리고, physical carrier sensing과 함께 동작된다.

1.2 Periodic Sleep and Listen state

센서망에서 각 노드들은 일정한 주기의 3가지 상태를 반복하게 되는데 initiation, sleep, listen이 그것이다. 첫 번째 상태 initiation에서는(최초 노드가 필드에 뿌려질때) 자신의 스케줄을 시작하고 설정을 하게 된다. 그 후 Sync를 맞춘 노드들은 정해진 스케줄에 따라 sleep 상태에 있거나 listen 상태에 있을 수 있다. 이러한 고정되어진 주기는 노드가 battery off 상태에 가거나 더 이상 통신에 참여 할 수 없을때까지 반복된다. sleep 주기 동안에는 노드들은 자신의 무선 radio를 끄고 다시 일어날 시간의 타이머를 동작시킨다. 모든 노드들은 initiation 주기 동안에 자신만의 listen/sleep 주기를 선택하여 Sync 할 수 있다. 다시말해 한 노드가 두 노드 사이의 통신이 가능한 최대 거리에 맞 물려있다면 이 노드는 두가지 스케줄을 모두 따르게 되고, 이는 상대적으로 다른 노드들에 비해 많은 양의 에너지를 소비하기 때문에 바람직하지 못하다.

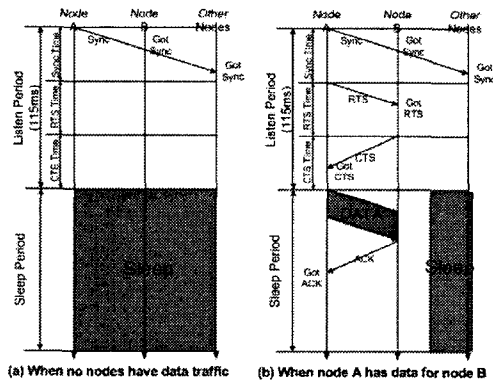
1.3 Overhearing 회피

Overhearing은 무선 센서망에서 소비하는 에너지들 중 가장 많은 에너지 소비를 보인다. 특히 노드의 트래픽이 많거나 혹은 조밀도가 높다면 더 많은 에너지 소비특성을 보일것이다. S-MAC은 간섭하는 노드들을 sleep 모드로 보냄으로써 overhearing을 줄 일수 있다. 데이터 패킷들은 대체로 control 패킷보다 길기 때문에, 이웃하는 노들이 긴 데이터 패킷과 ACK패킷을 듣는것을 막을 수 있다. 그러므로 송신자/수신자와 이웃하는 모든 노드들은 RTS/CTS 패킷을 듣고 난후 현재의 전송이 끝날 때 까지 sleep 상태를 유지해야 한다.

1.4 Message Passing

제어 패킷의 부하를 줄이기 위해 긴 길이의 메시지를 하나의 패킷처럼 취급하는 방식에 있어서 수신단에서는 데이터의 처리나 병합을 위해서 모든 데이터 유닛, 즉 메시지 전체를 받을 때까지 기다릴 필요가 있다. 따라서 S-MAC에서는 긴 메시지를 단편화하고 이것을 한꺼번에 보내는 방식을 선택했다. 이때 RTS/CTS 제어 패킷이 단 한 차례만 쓰인다. 한 차례의 RTS/CTS 교환으로 전체 메시지가 여러 없이 성공적으로 전송된다면 가장 이상적인 경우로 생각할 수 있지만, 전송중의 단편화 과정에서의 에러가 있을때는 송신측에서 타이머를 늘려 즉시 재전송하는 방식을 사용한다. 이 때 802.11과는 달리 RTS/CTS를 사용해야하는 경쟁상태가 일어나지 않는다.

1.5 S-MAC problem



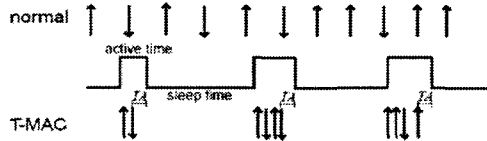
<그림 1> S-MAC problem

S-MAC은 SYNC/RTS/CTS로 나누어진 긴 listen interval을 가지고 있다. <그림 1>은 S-MAC 프로토콜의 전반적인 주기를 보여주고 있다. 노드 A는 SYNC 이후에 경쟁에서 매체를 예약을 위해 RTS를 노드 B에게 보내게 된다. 노드 A가 매체를 할당받아서 데이터를 전송한다면 노드 B는 RTS에 대한 응답 CTS를 노드 A에게 응답한다. 이때 이웃하는 노드들도 B의 CTS를 듣는다. 성공적으로 RTS/CTS교환이 이루어지면 앞서 언급했듯이 두 노드들은 데이터 전송이 끝날 때까지 listen 주기에 있게 되고, 데이터 전송에 직접적인 연관이 없는 다른 노드들은 sleep 주기에 들어가게 되는데 이때, 상대적으로 노드 A와 B의 데이터 전송이 빨리 끝나면 다른 노드들의 sleep 주기가 끝날 때까지 이 노드들은 sleep 모드가 끝날때까지 깨어있어야 만하고, 다른 sleep 상태에 있는 모든 노드들은 전송에 참여 할 수 없다. 그리고 3가지의 고정된 listen 주기로 인해 보낼 데이터가 없을 때 즉, Sync 패킷만을 교환할때도 RTS time/CTS time을 포함하는 listen 주기가 끝

나는 시간까지 기다린 다음에 sleep 모드로 갈 수 있다. S-MAC은 idle listening을 줄일 수 있는 효율적인 메커니즘을 제공하지만 고정되어진 listening mode로 인한 전력과 bandwidth 낭비를 초래한다.

2. T-MAC

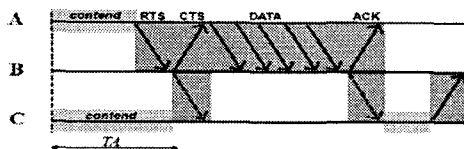
고정되어진 duty cycle을 가진 S-MAC은 에너지 소비에 있어서 효율적인 방안을 제시하지 못했다. T-MAC에서는 S-MAC의 sleep 주기에서 발생할 수 있는 에너지 소모를 줄였다는 점에서 의미를 갖는다. S-MAC에서는 listen 주기에서 RTS, CTS를 교환한 노드들은 전체 sleep주기 동안 계속 깨어있어야 했다. 하지만 두 노드의 데이터 전송이 끝났음에도 불구하고 계속해서 wake 상태를 유지하는 것은 에너지 낭비이다. T-MAC에서는 TA란 시간을 두어 TA 시간 동안 데이터의 전송이 없을 경우, 바로 sleep 함으로써 불필요한 에너지 소모 문제를 해결하였다.



<그림 2> Basic T-MAC protocol scheme with adaptive time

2.1 RTS operation and choosing TA

경쟁 기반 프로토콜 IEEE 802.11에서는 충돌이 발생하면 임의의 시간동안 기다리게 된다. 보통 back-off scheme가 사용되는데, 이때 contention interval은 트래픽이 높을때 증가하게 된다. T-MAC 프로토콜에서, 모든 노드들은 자신의 프레임 시작시에 한번에(burst) 메시지를 보낸다. 이러한 burst 시간동안 매체는 포화상태가 되고 메시지는 maximum rate로 전송되어 진다. RTS는 고정된 경쟁을 위한 주기를 거친후에 waiting/listening 후 전송되어진다. contention time은 충돌이 발생하지 않더라도 항상 사용되어 진다. 송신을 원하는 노드가 TA interval 동안에 아무런 응답을 받지 않으면 sleep 모드로 들어가야만 하고 이때 수신 노드가 깨어 있을때는 2번까지 재 전송 후 sleep 모드로 들어간다.



<그림 3> Adaptive TA interval

2.2 Determining TA

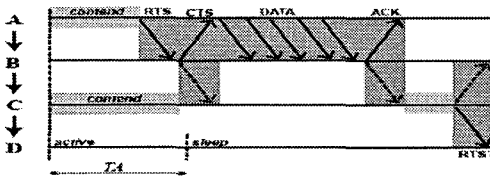
노드는 다음에 수신될지 모르는 메시지의 송신자가 될수도 있기 때문에 자신의 이웃노드가 통신을 하고 있을때는 sleep 모드로 들어가면 안된다. 이웃 노드로부터의 RTS/CTS의 받는 시간은 TA 시간보다 충분히 작아야 하고, 노드가 통신범위 밖에 있을때에는 RTS를 들을 수 없기 때문에 TA interval은 적어도 CTS 시작 시간보다 충분히 길어야 한다. 다음은 이러한 TA interval의 최소 길이를 말한다.

$$TA > C + R + T$$

C : Contention interval

R : RTS 패킷의 길이

T : Turn-around time(RTS가 끝나는 시간과 CTS의 시작시간의 interval)



<그림 4> early sleeping problem

2.3 T-MAC Problem

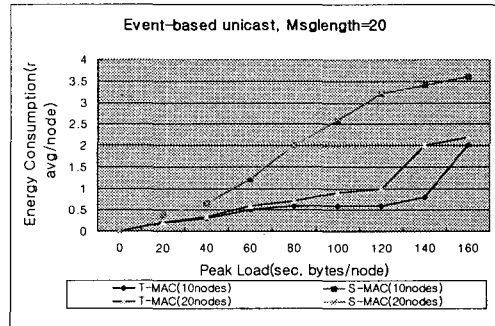
<그림 4>에서 각 노드들은 센서 노드의 특성상 그림의 위에서 부터 아래의 순서로 각각 메시지 전송을 할 수 있다. 노드 C를 고려해보면 노드 C가 D로의 통신을 원할 때 C는 경쟁에 들어가야 하고 만약 이때 A와 B가 RTS/CTS 교환을 통해 데이터 전송이 이루어지고 있을때, 노드 C는 TA 기간 동안에 전송을 할 수가 없게 되고 A, B의 전송이 끝날 때 까지 기다린 후 B는 C와 통신을 하고 다시 C는 D와 통신을 시작할 수가 있다. 이 시간동안 노드 D는 sleep 상태를 계속 유지해야만 한다. Throughput 측면에서 볼 때 노드 C는 50%의 전송성공률을 가지며 노드 D는 25%의 전송 성공률을 가진다. 이러한 문제를 early sleeping problem 이라고 부르고 S-MAC 보다 50% 낮은 Throughput을 보인다.

III. 결론

1. 시뮬레이션

실험은 S-MAC과 T-MAC을 비교 분석하기 위함이고 Omnet++를 사용하여 각 10노드와 20노드 환경에서의 다른 traffic load를 주어 에너지 소비를 측정하였다. <그림 5> T-MAC은 overhearing avoidance를 사용하지만 full-buffer를 사용하지

않는다. T-MAC은 S-MAC보다 적은 에너지를 사용하였지만 T-MAC에 적절한 최고 bandwidth가 S-MAC보다 낮기 때문에 트래픽 로드와 노드의 density가 높을 때에는 에너지소비가 현저하게 많다. 본 실험에서는 edge 노드들의 수가 많기 때문에 T-MAC은 early sleeping problem을 보인다.



<그림 5> Peak Load vs. Energy Consumption(with 10, 20 nodes)

2. 결론

이 논문에서는 무선 센서 망에서의 MAC 전력 소모에 대해서 간단하게 살펴보고, 대표적인 MAC 프로토콜 T-MAC/S-MAC을 고찰하였다. 적은 수로 이루어진 낮은 peak load에서의 T-MAC은 같은 실험환경의 S-MAC보다 좋은 에너지 특성을 보이고 있다. 차후의 실험 환경에서는 실제적인 실험환경의 적용으로 보다 신뢰성 있는 연구가 요구되어 진다.

참고문헌

- [1] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in IEEE INFOCOM 2002, June 2002.
- [2] T. V. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, in ACM Sensys'03, Nov. 2003.
- [3] V. Rajendran, K. obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks," in ACM Sensys'03, Nov. 2003.
- [4] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin "Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks," in IEEE Transactions on Networking, June 2003.

- [5] P. Lin, C. Qiao, and X. Wang "Medium Access Control With A Dynamic Duty Cycle For Sensor Networks," in WCNC, Mar 2004.
- [6] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification, IEEE, New York, NY, USA, IEEE Std 802.11-1997 edition, 1997.
- [7] Tijs van Dam and koen Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", In Sensys '03 November 5-7, 2003, Los Angels, California, USA.
- [8] V.Bharghavan, A. Demers, S Shenker, and L.Zhang, "Macaw: A media access protocol for wireless lans," in Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference, 1994.
- [9] Mica Mote, <http://www.xbow.com/>