무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜 비교 분석

이상훈*, 이종용*, 박재성**, 김진수***

*광운대학교 교양학부 **정보통신대학원 ***대학원 전자과

The comparative analysis of the MAC Protocol in wireless sensor networks

Lee, Sang Hun*, Lee, Jong Yong*, Park, Jae Sung**, Kim, Jin Su***

*Kwangwoon University General Education **Graduate School of Information & communication ***Graduate School of Electronic Engineering

요 약

무선 센서 네트워크에서의 통신은 여러 계층으로 나뉘어 각 계층별 역할을 수행하므로 무선통신이 가능할 수 있다. 센서 네트워크에서의 통신계층 중 하나인 MAC(Medium Access Control)계층은 데이터의 에러, 흐름을 제어하고 자원을 관리하기 위해서 사용되며 MAC Protocol을 사용하여 센서 노드간의 통신을 보장한다.

전통적인 MAC Protocol은 패킷 처리율의 최대화, 지연의 최소화 및 공평성 제공이 주된 목적으로 설계된 된다. 무선 센서 네트워크에서 MAC 프로토콜은 응용에 따라 차이는 있으나 대부분 많은 센서 노드들로 구성된다. 또한 멀티 홉 통신을 하기 때문에 센서 장치의 제한된 배터리 수명으로 인해 소모되는 에너지를 최소화 하여 네트워크 에너지의 효율성을 높이는 것이 가장 큰 목적이다.

본 논문에서는 에너지 효율성 측면을 강조하기 위해서 MAC프로토콜의 문제점을 알아보고 그 중에서 최우선적으로 요구되는 에너지 효율성에 대해서 S-MAC, T-MAC의 비교와 T-MAC의 확률값을 변경에 따른 어느 경우가 가장 효율적인지 active time을 통하여 알아보았다.

1. 서론

유비쿼터스 컴퓨팅을 가능하게 해주는 기술 기반의 하나인 유비쿼터스 센서 네트워크란, 주변 사물과 환경을 인식하고 네트워크를 통해 실시간 정보를 구축 활용토록 하는 초소형, 저 전력 센서들로 구성된 무선 통신망이라 할 수 있다. 센서 네트워크에서는 각 노드들이 센싱한 데이터는 사용자 인터페이스가 제공되어지는 싱크 노드로 반드시 전달되어야 한다. 이는 하나의 데이터가 여러 번 반복해서 전달되게 되고 멀티 홉 포워딩(multi-hop forwarding)을 사용하는 센서 네트워크의 특성으로 인하여 sink 노드 주변의 노드들은 많은 수의 데이터 패킷을 전달해야 하기 때문에 다른 노드들보다 더 빨리 죽게 되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상이 나타나는 가장 큰 원인은 각 노드마다 전송해야 하는 데이터 량의 차이 때문이지만, 데이터 량을 줄일 수는 없기 때문에 이러한 네트워크 상황에서는 데이터 전송에 드는 나머지 에너지 소비의 원인인 컨트롤 패킷 량을 줄이는 방법을 생각해볼 수 있다.

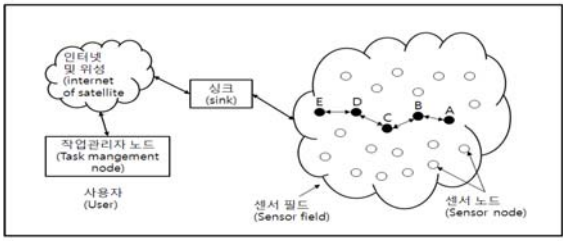
본 논문은 에너지 효율성 측면을 강조하기 위해서 MAC프로토콜의 문제점을 알아보고 그 중에서 최우선적으로 요구되는 에너지 효율성에 대해서 S-MAC, T-MAC과 T-MAC의 확률값을 변경하여 어느 경우가 가장 효율적인지 active time을 통하여 알아보았다.

본 논문의 구성은 1장은 서론 2장은 센서 네트워크의 개념 3장에서는 S-MAC프로토콜 4장은 T-MAC프로토콜 5장에서는 MAC 프로토콜의 active time의 분석, 6장에서는 결론으로 나누었다.

2. 센서 네트워크 개념

2.1. 센서 네트워크 개념

가. 센서 네트워크의 통신 구조



[그림 1] 센서 네트워크의 통신구조

센서노드는 그림 1에서 보는 것처럼 센서 필드 내에서 흩어져 있다. 흩어져 있는 각각의 센서노드들은 싱크를 통해서 되돌아온 데이터를 수집할 수 있다. 노드에서 수집한 데이터는 사용자에 의해서가 아니라, 멀티 홉 구조의 통신 기법을 통해 싱크로 전달된다. 싱크는 인터넷이나 위성통신을 통해 태스크 관리자 노드로 전달된다.

3. S-MAC Protocol

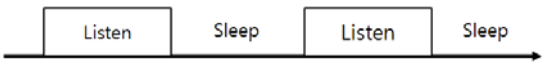
SMAC은 센서 네트워크를 위해 가장 처음 제안된 다중 접속 프로토콜로 전력 소모를 줄이는 것을 주된 목적으로개발 되었다. 하지만 SMAC에서는 전력 소모 최소화뿐만 아니라 충돌의 최소화와 시스템 확장성 또한 중요한 시스템 요소로 다뤄지고 있다

가. S-MAC의 duty cycle

무선 센서 네트워크에서의 데이터 발생률이 매우 낮은 경우 노드가 항상 listening을 유지하는 것은 idle listening으로 인한 에너지 낭비의 원인이 되는데, 이러한 문제점을 해결하기 위해 S-MAC은 duty cycle을 적용하여 노드가 주기적으로 sleep모드로 들어가게 함으로써 idle listening 시간을 줄일 수 있다. S-MAC은 주기적인 listen and sleep과 충돌 회피, 오버히어링 회피, 메시지 전달의 주된 4가지 기능이 있다.

(1) 주기적인 listen and sleep

많은 센서 네트워크 응용에서 노드들이 사건이 발생한 것을 감지하지 못했다면, 오랫동안 idle한 상태로 있게 된다. 노드들은 이 기간에 listen상태를 유지할 필요가 없다. 이런 프로토콜은 주기적으로 sleep 모드로 전환 되서 listen time을 감소시킬 수 있다.



[그림 2] 주기적인 listen and sleep

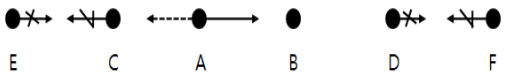
기본적인 기술은 그림 2에서 보여주고 있다. 각 노드는 sleep 모드로 있다가, 깨어난 후 다른 노드가 통신을 원하는지를 알기 위해서 listen하게 된다. Sleep 동안에 노드는 radio를 turn off한 후에 나중에 스스로 깨어나기 위해 타이머를 설정하고 listen과 sleep 의 한 주기를 프레임이라 부른다.

(2) 충돌회피

모든 노드들이 동시에 같은 지역에서 패킷을 전송할 때, 충돌이 발생할 수 있는데 이런 패킷의 손실을 막는데 사용된다. 2개 이상의 노드가 상황을 감지하여 동시에 이웃 노드들에게 패킷을 전송할 때, 충돌이 발생한다.

(3) 오버히어링 회피

충돌 회피를 위한 RTS/CTS기법을 확장한 기법이다.



[그림 3] 오버히어링 회피

노드 A가 B에게 데이터 패킷을 보냈을 때 위 그림 3에서 보듯이 E, F 노드는 간섭을 하지 않기 때문에 그들은 sleep모드로 들어가지 않아도 된다. C는 B로부터 2홉 떨어져 있으며 B로부터 방해를 받지 않는다. 그래서 E와 같이 다른 이웃 노드들에게 전송이 자유롭다. C는 E에게 전송을 할 수 있지만, A가 패킷을 송신 중일 때는 C가 E로부터 응답을 받을 순 없다. 그래서 C가 에너지 소비의 원인이 된다. 따라서 송신 노드와 수신노드의 모든 단일 홉 이웃 노드들은 RTS/CTS를 수신한 후 현재 패킷 송신이 끝날 때까지 sleep 모드로 들어가야 한다.

(4) 메시지 전달

메시지는 서로 관계된 데이터들의 집합이다. 큰 길이의 메시지를 단일 여러 개의 데이터 패킷으로 분할하여 한 개의 RTS와 CTS로 채널을 예약한 후, 데이터 패킷을 보낸다. ACK패킷을 수신하지 못했을 때 패킷은 재전송 될 수밖에 없으며, 채널은 추가 데이터만큼 예약을 해야 한다.

4. T-MAC Protocol

TMAC은 SMAC에 부가적인 기능을 추가한 다중 접속프로토콜 이다. SMAC과는 달리 수신자가 짧은 Listening Peniod에서 패킷을 수신 받지 못하면 바로 Sleep 모드로 전환할 수 있다. 이는 시스템의 전체적인 Wake-up 시간을 줄여 전력을 보존할 수 있도록 해준다.

5. MAC Protocol의 active time 분석

본 장에서는 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 S-MAC, T-MAC의 문제점에 대해서 알아보고 S-MAC, T-MAC 프로토콜과 T-MAC에서 데이터가 송수신 될 확률값을 변경하여 active time을 분석한다.

(가) MAC Protocol의 문제점

센서 네트워크에서 노드는 매우 작은 배터리로 동작하므로 인해, 최소의 에너지를 사용하여 최대의 효과를 요구하게 된다. 이런 목적을 충족하기 위해 duty cycle을 적용하는 S-MAC, T-MAC의 문제점에 대해서 살펴본다.

(1) 에너지 효율성

고정된 duty cycle을 사용하는 S-MAC은 기존의 전통적인 무선 MAC 프로토콜보다 에너지 효율성 측면에서는 좋은 결과를 가져오지만, 센서 네트워크에서 노드가 센싱 하는 데이터의 양이 극히 적은 경우 불필요한 idle listening을 수행하므로, 에너지 효율성이 떨어지게 된다.

(2) 패킷 우선순위 보장

센싱 되는 데이터 가운데 긴급을 요하는 데이터가 일반적인 데이터보다 우선적으로 전송되어야 하며, 이처럼 우선순위가 높은 데이터를 가지고 있는 노드에게 우선적으로 전송기회가 주어져야 하나, 기존은 MAC 프로토콜에서는 패킷의 우선순위를 보장 할 수 있는 방안이 없다.

(3) 제어 신호 부하

무선 네트워크에서 데이터를 전송하기 위해서는 전송 매체를 경쟁을 통해 확보한 다음 제어 신호를 전송한 이후에 데이터를 전송하게 된다. 그러나 센서 네트워크에서 작은 양의 데이터를 전송하기 위해 제어 신호를 많이 사용하는 것은 에너지 효율적인 측면에서 비효율적이라 할 수 있다.

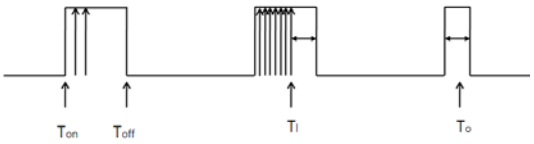
이러한 문제점들 중에서 최우선적으로 에너지 효율성의 문제에 대해서 S-MAC, T-MAC의 active time에 대해서 수학적으로 분석한다.

(나) Active time에 대한 수학적 분석

센서 네트워크에서 최우선적으로 추구하는 목적은 앞에서 언급했듯이 에너지 효율성이다. 무선 MAC 프로토콜에서 에너지는 라디오가 켜져 있는 시간 동안에는 항상 소모가 되며 동일한 양의 데이터를 송수신 한다고 할 때 짧은 active time동안 모든 데이터를 전송하고, 빨리 sleep 모드로 전화되는 것이 에너지 효율적인 측면에서 가장 우수할 것이다.

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 S-MAC, T-MAC프로토콜에 대해서 데이터 전송 시 active time을 수학적으로 분석한다.

(1) S-MAC과 T-MAC의 active time 분석



[그림 4] MAC 프로토콜의 duty cycle

S-MAC과 T-MAC 프로토콜의 성능을 검증하기 위해서 에너지 효율성에 대해서 수학적으로 분석하고, active time의 파라미터는 아래의 표 1과 같다.

[표 1] Active time의 파라미터 분석

T_t	Active 모드에서 라디오 켜져 있는 전체 시간
T_A	각 프레임에서 active 시간
T_{on}	각 프레임의 라디오가 켜지는 시각
T_{off}	각 프레임에서 라디오가 꺼지는 시각
T_l	마지막 패킷을 송수신한 시각
T_f	프레임의 전체 시간
T_o	T-MAC에서의 time out 시간
P	T-MAC의 Active 시간 동안 데이터가 없을 확률
Q	T-MAC의 Active 시간 동안 데이터가 있을 확률
P + Q = 1	

(2) S-MAC 프로토콜의 active time분석

S-MAC 프로토콜의 전체 active time은 각 프레임에서 라디오가 꺼지는 시각에서 라디오가 켜지는 시각의 차에 대해 전 프레임에 대한 합으로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

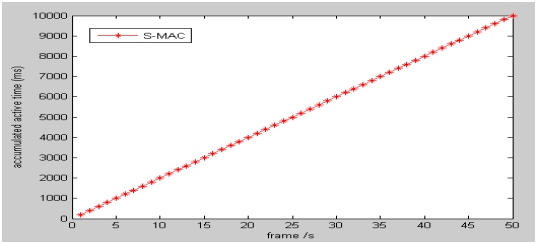
$$T_t = \sum_i T_{A_i} = \sum_i (T_{off_i} - T_{on_i}) \qquad (1)$$

식(1)에서 프레임의 수(i)는 1부터 50으로 고려하였으며, MATLAB으로 소모되는 active time에 대한 식을 적용하여 결과를 살펴보았다. 에너지 사용시간 분

석을 위해 파라미터는 표 2와 같이 고려하였다. 여기서 프레임 길이와 duty cycle을 각각 1000ms와 20% 설정하였고, 프레임 길이의 20%와 각 프레임의 라디오가 꺼지는 시각과 라디오가 켜지는 시각의 차가 같도록 각각 300ms와 100ms로 설정하였다. 식(1)과 표 2의 파라미터값을 이용하여 누적된 active time을 그래프로 표현하면 그림5 와 같다.

[표 2] 누적된 active time의 파라미터 값

frame length	1000ms
duty cycle	20%
T_{off}	300ms
T_{on}	100ms



[그림 5] S-MAC의 active time 분석

그림 5에서 S-MAC은 20%의 고정된 duty cycle의 일정한 active time에 라디오는 항상 송수신 모드가 가능하게 켜져 있으므로, 송수신할 데이터 유무에 상관없이 일정한 시간에 에너지가 소모되어 프레임이 증가함에 따라 에너지 소모량도 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있다.

(3) T-MAC 프로토콜의 active time분석

T-MAC 프로토콜의 성능을 검증하기 위해서 에너지 효율성에 대해서 수학적으로 분석하였다.

T-MAC프로토콜에서는 두 가지 경우의 확률로 구분된다. 먼저, 각 프레임 별로 active time동안 송수신되는 데이터가 없는 경우의 표 1에서 정의된 확률 P에 의하여 소모되는 active time(T_{A_p})는 식(2)과 같이 정의 된다.(단, P+Q=1)

$$T_{A_p} = P \times T_o \tag{2}$$

반면 active time동안 송·수신 자료가 있는 경우 에너지가 소모되는 active time(T_{A_q})은 식(3)과 같이 정의 된다.

$$T_{A_q} = Q \times (T_l - T_{on}) + T_o \tag{3}$$

따라서 T-MAC 프로토콜에서의 전체 active time은 식(4)과 같이 정의 된다.

$$T_t = \sum_i (T_{A_{p_i}} + T_{A_{q_i}}) = P\sum_i T_{o_i} + Q\sum_i [(T_{l_i} - T_{on_i}) + T_{o_i}] \tag{4}$$

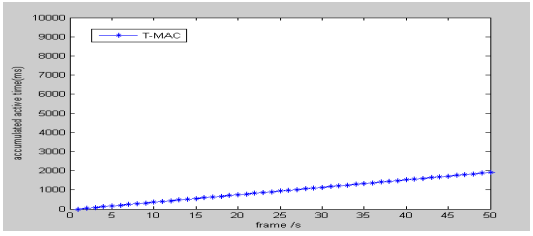
Timeout(T_o)의 시각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_o > C + R + T \tag{5}$$

식(5)에서 C는 contention slot이며, R은 RTS 패킷의 길이, T는 RTS와 CTS 패킷 사이의 아주 짧은 시각이다. 식(4)에서 프레임의 수(i)는 1부터 50으로 고려하였으며, MATLAB으로 소모되는 active time에 대한 식을 적용하여 결과를 살펴보았다. 에너지 사용 시간 분석을 위해 파라미터는 표 3과 같이 고려하였다. S-MAC과 같이 프레임 길이와 duty cycle을 각각 1000ms와 20%설정하였고, 프레임 길이의 20%와 마지막으로 패킷을 송수신한 시각(T_l)은 T_{off}에서 T_o의 값을 뺀 275ms, Timeout시각(T_o)은 15ms, 송수신될 데이터의 확률 P, Q는 각각 0.5로 설정하였다. 식(4)과 표 3의 파라미터값을 이용하여 누적된 active time을 그래프로 표현하면 그림 6과 같다.

[표 3] 누적된 active time의 파라미터 값

frame length	1000ms
duty cycle	20%
T_{on}	100ms
T_l	275ms
T_o	15ms
P	0.5
Q	0.5
contention slot	256
RTS	20byte
CTS	14byte



[그림 6] T-MAC의 active time분석

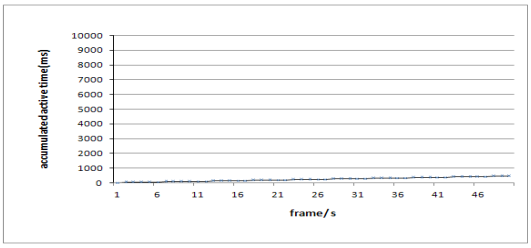
위 그림 6에서 보듯이 T-MAC의 경우 S-MAC은 고정된 duty cycle이라서 위에서 언급한바와 같이 데이터 유무에 상관없이 일정한 시간동안 에너지가 소

비되어 프레임이 증가함에 따라 에너지 소모량도 선형적으로 증가를 하지만, T-MAC의 경우에는 TA구간동안 데이터가 없다는 것을 인지하면 바로 sleep 모드로 들어가서 S-MAC에 비해 에너지 면에서는 효율적임을 그래프로 보여주고 있다.

(4) T-MAC의 확률에 따른 active time

T-MAC 프로토콜에서 각 프레임 별로 active time 동안 송수신 데이터가 있는 경우와 없는 경우의 확률값을 변경하여 T-MAC 프로토콜의 active time을 분석하였다.

즉, T-MAC의 active time동안 데이터가 없을 확률 P=0.1과 데이터가 있을 확률 Q=0.9값에 따른 누적 active time의 그림은 다음과 같다.



[그림 7] P=0.9 Q=0.1에서 T-MAC의 active time 분석

위의 그림 7에서 active time동안에 송수신될 데이터가 없을 경우의 확률 P값이 커질수록 sleep 모드로 들어가는 시간이 빨라짐으로 에너지가 더 절감되며, 송수신될 데이터가 있을 경우의 확률 Q값이 클 때는 데이터 송수신이 없을 때까지 기다려야 하기 때문에 에너지가 더 소비 된다는 것을 알 수 있다.

(5) S-MAC, T-MAC의 비교 분석

S-MAC과 T-MAC의 active time의 다음과 같이 표로 요약된다.

[표 4] S-MAC과 T-MAC의 accumulated active time

구분	accumulated active time
S-MAC	10000
T-MAC	1950

S-MAC과 T-MAC의 active time을 비교 분석 했을 때 S-MAC의 경우에는 일정한 duty cycle로 인해 송수신할 데이터가 없어도 일정 시간을 기다렸다가 sleep모드로 들어가기 때문에 그 시간동안 에너지가 계속 소모되므로 에너지 소비가 크며, T-MAC의 경우에는 일정한 duty-cycle에 일정한 대기 시간이라고 하는 TA구간이라는 것을 두어서 TA구간동안에 송수신하는 데이터가 있을 경우에는 수신을 하고 없을 경우에는 S-MAC과 같이 기다리지 않고 바로 sleep 모드로 들어감으로서 S-MAC 보단 T-MAC이 훨씬 효율적임을 알 수 있다.

(6) 확률값에 따른 active time에 대한 분석

T-MAC에서 각 프레임 별로 송수신 데이터가 없을 때 확률 P=0.9 Q=0.1일 때 기다리지 않고 바로 sleep 모드로 들어감으로서 에너지 소비를 가장 많이 줄일 수 있었고, 데이터가 있을 확률 P=0.1 Q=0.9로서 클 경우에는 송수신할 데이터를 기다려야 하기 때문에 없을 경우 보다는 에너지가 더 소비된다는 것을 알 수 있다.

[표 5] Accumulated active time

P	Q	accumulated active time
0.1	0.9	3050
0.2	0.8	2650
0.3	0.7	2400
0.4	0.6	2150
0.5	0.5	1950
0.6	0.4	1842
0.7	0.3	1734
0.8	0.2	750
0.9	0.1	450

6. 결 론

S-MAC은 일정한 duty cycle을 적용하여 송수신되는 데이터가 없어도 항상 라디오가 켜있기 때문에 에너지 소모가 많이 되는 문제점이 있었다. 에너지 손실을 줄이기 위해 T-MAC에 TA구간을 주어 데이터가 없을 경우에는 바로 sleep모드로 들어가서 에너지를 소모를 줄일 수 있었다. 그리고 T-MAC에서의 송수신할 데이터에 확률값을 변경하여 active time을 통하여 알아보았다.

확률값을 각각 변경하고 수학적으로 분석하여 TA구간동안 데이터가 없을 경우 확률값이 큰 경우 에너지 소모 면에서 절감 된다는 것을 알 수 있었다.

향후 센서 노드 버퍼에 임계값을 설정하여 기준 이상인 경우에만 전송함으로서 네트워크의 트래픽에 무관하게 idle listening으로 인한 에너지 소모를 최소화하여 에너지 효율성을 극대화 하는 방법에 대해서 연구가 필요하다. 센서 노드 버퍼 임계값을 설정하여 에너지 효율성을 극대화한 기법은 센서 네트워크 뿐만 아니라 저 전력 통신이 요구되는 미래 기술에서

효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “A survey on sensor networks”, IEEE Communications Magazine, vol.40, no.8, pp.102-114, 2002.

[2] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, Fatih Alagoz. “MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey.” Communications Magazine, vol.44, no.3, pp.115-121, 2006.

[3] Wei Ye, John Heidimann, Deboriah Estrin. “Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks.” Transaction on Networking, vol.12, no.3, pp.1-14, 2004.

[4] Tijs van Dam, Koen Langendoen. “An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks.” Proceedings of SenSys '03, ACM, Los Angeles, USA, pp.164-174. November 2003.