

무선 센서 네트워크에서 주기적인 트래픽의 효율적인 모니터링을 위한 MAC 프로토콜

김동민*, 김성철**

*상명대학교 일반대학원 컴퓨터학과

**상명대학교 컴퓨터과학부 교수

e-mail:dongmin@smu.ac.kr

PM-MAC : An Efficient MAC Protocol for Periodic Traffic Monitoring In Wireless Sensor Networks

Dong-Min Kim*, Seong-Cheol Kim**

*Dept of Computer Science, Sang myung University

**Dept of Computer Science, Sang myung University

요 약

본 논문에서는 트리구조의 네트워크 환경에서 주기적인 트래픽의 효율적인 모니터링을 위한 TDMA(Time Division Multiple Access)기반의 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 주기적인 모니터링 환경을 위해 제안된 기존의 연구[1]는 트리구조가 깊어지고, 자식 노드들이 많은 환경에서 에너지 소모가 증가하고, 데이터 처리율이 떨어지는 문제점을 갖는다. 이를 해결하기 위해 유휴 타임 슬롯(Time Slot)을 활용하고, 데이터를 중복되지 않게 보내는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존연구와의 비교를 통해 더 높은 데이터 처리율과, 에너지를 적게 소모함을 보였다.

1. 서론

센서 네트워크는 기존 Ad-hoc 네트워크에 비해 수 배 혹은 수 십 배 이상의 많은 센서노드들로 구성되며, 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들은 보통 같은 목적의 일을 수행한다. 따라서 발생하는 데이터도 지역적으로 비슷할 가능성이 높다. 또한, 센서 노드들은 배터리를 전력원으로 사용하는데, 그것의 교체가 쉽지 않기 때문에 송수신 횟수, 연산 능력, 그리고 메모리 사용 등에 제약이 따른다. 따라서 센서 노드는 감지한 데이터 모두를 그대로 전송하는 것이 아니라, 지역적으로 노드간의 데이터를 계산 및 처리하여 최소한의 필요한 데이터만을 전송해야 한다. 이는 네트워크의 수명과 관련 있기 때문에 전력 사용을 최소화하는 많은 연구가 현재 진행되고 있다. 하지만 이러한 전력 사용을 최소함에 따른 Trade off는 전송지연으로 인한 데이터의 처리율 감소를 유발하므로 이를 어떻게 조절하는가 또한 큰 이슈가 되고 있다.

이에 본 논문에서 주기적으로 주변 환경(온도 측정, 수심 측정 등)을 관측하는 무선 센서 네트워크에서 데이터 처리율을 높이고 네트워크 전체의 수명(Life Time)을 고려한 효율적인 프로토콜을 제안한다. 모든 노드는 BS(Base Station)에 의해서 동기화되며, BS가 정해진 시간에만 일어나서 동작한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구에 대해서 설명한다. 3장에서는 PM-MAC에 대해서 설명하고, 4장에서 기존 연구와의 성능을 비교 분석하고, 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구계획으로 맺는다.

2. 관련연구

무선 센서 네트워크를 기반으로 하는 MAC 프로토콜에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중에 에너지의 소모와 전송지연을 줄이는 목적을 갖는 프로토콜은 다음과 같다.

SMAC[2]은 무선 센서 네트워크 환경에서의 에너지 소모를 줄이는 연구 중 가장 대표적인 프로토콜로써, Duty Cycle 프레임을 사용하여 일정한 Sleep과 Listen구간을 반복적으로 동작시킴으로써 에너지 소모를 줄였다. 그러나 주기적인 동작과 RTS/CTS를 통해 가장 먼저 보낸 노드만이 전송에 참여하는 방식은 전송 지연이 발생한다는 단점이 있다. 이에 D-MAC[3]에서는 Sleep과 Listen구간을 엇갈리게 스케줄링하여 하위 노드의 송신 시간과 상위 노드의 수신시간을 맞춰 전송하는 방식으로 SMAC[2]의 전송 지연을 해결하였다. 하지만 D-MAC 역시 CSMA(Carrier Sense Multiple Access)방식을 사용하기 때문에 여러 하위 노드가 상위 노드에 데이터를 전송하기 위하여 경쟁해야 한다. 이는 충돌을 회피하기 위해 RTS/CTS, 백오프(Backoff), CW(Contention Window)를 사용해야 하기 때문에 오버헤드가 발생하게 된다.

SEA-MAC[4]은 주기적인 데이터가 발생하는 모니터링 환경에서 동기화를 통해 에너지소모를 줄이는 것을 목표로 하는 프로토콜이다. 노드는 자신이 모니터링한 데이터를 전달하는 시간에 동기화를 하여 전송하게 되는데 이를 통하여 Idle Listening 기간을 최소화하고, 그에 따른 에너지 효율을 증가시켰다. 그 후 새로이 제안된 SEA-MAC

v2[1]에서는 모니터링한 데이터를 BS(Base Station)에 전송할 때 RTS/CTS를 사용하지 않고 데이터만을 전달하는 방법을 제안하였다. 하지만, 각각의 노드가 측정한 데이터를 한 라운드에서 보내는 횟수가 다르고, 리프(Leaf) 노드의 깊이(depth)가 증가함에 따라 전송시간이 길어지는 단점을 갖고 있다. 또한 상위 노드에 트래픽이 가중되기 때문에 이로 인한 상위 노드의 수명을 고려되지 않았고, 네트워크가 복잡해지는 것에 따른 중복 데이터의 증가를 고려하지 않았다.

이에 본 논문에서는 주기적인 모니터링환경에서 모든 노드의 데이터가 BS에 수집되는 시간을 줄이고, 상위 노드의 에너지소모를 줄여 네트워크 전체의 수명을 향상시키는 동시에 전체 노드의 에너지소모를 줄이는 방법을 제안한다.

3. PM-MAC (Periodic Traffic Monitoring MAC)

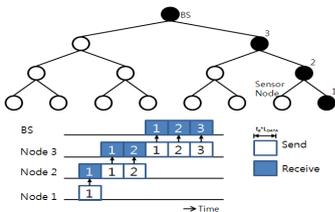
1) PM-MAC 개요

기존 연구[1]는 트리구조의 토폴로지에서 측정된 데이터를 상위 노드에 전달하면서 매번 자신의 데이터를 추가하여 보내게 되면, 상위 노드는 하위 노드보다 더 많은 자신의 데이터를 보내게 된다. 또한 하위 노드에서 오는 데이터를 받은 다음 자신의 데이터를 보내는 방식은 리프노드의 깊이가 증가할수록, 리프노드에서 측정된 데이터가 BS에 도착하는 시간이 길어지는 문제점을 갖고 있다. 이에 본 논문에서 제안하는 PM-MAC은 TDMA 방식을 사용하여 기존 연구의 문제점을 해결하고, 결과적으로 전체 데이터 처리율을 향상시키며, 동시에 에너지 소모를 줄이는 것을 목표로 한다.

다음은 본 논문에서 제안한 타임 스케줄링 방식과 루트 분할 방식에 대해서 설명한다.

2) 타임 스케줄링

타임 스케줄링은 그림1에서 보이는 것과 같이 각 노드가 모니터링한 데이터를 BS에서 할당된 슬롯에서만 송수신을 한다. 이와 같은 방식은 기존의 연구[1]와 D-MAC[3]과 유사하지만, 본 논문에서 제안하는 방식은 RTS/CTS를 사용하지 않고, 각 노드는 모니터링한 데이터를 한 번만 보내며, 노드는 라디오의 간섭을 피할 수 있는 3홉(hop) 간격의 상위 노드에 타임 슬롯(Time Slot)을 사용하도록 한다.



(그림1) PM-MAC 알고리즘의 타임 스케줄

그림1을 보면 BS로 갈수록 송수신하는 길이가 길어지

는 것을 확인할 수 있다. 이는 BS에 가까워질수록 자신의 데이터와 자식 노드에서 보내온 데이터를 포함해서 전달하기 때문이다.

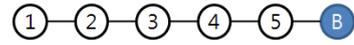
본 논문에서 제안하는 스케줄은 아래의 그림2와 같다. 각 노드는 BS가 정해준 타임 슬롯에서 데이터 수신 슬롯(R), 데이터 송신 슬롯(T), Sleep 슬롯(S)으로 한 라운드(Round)를 나눈다. 또한, 한 슬롯은 데이터 패킷이 보내는 데에 걸리는 시간($t_B * L_{DATA}$)을 기준으로 나누어진다.



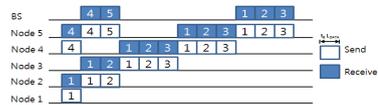
(그림2) PM-MAC의 타임 슬롯 스케줄

즉, 모든 노드는 동일한 스케줄로 동작하지 않고 자신의 위치에 따라 다른 스케줄을 BS로부터 할당받으며, 자신이 모니터링한 데이터를 BS에 전달할 때에 노드의 3홉 간격으로 상위 노드들이 동작할 수 있도록 타임슬롯을 사용하여 전송효율을 증가시킨다. 이와 같은 스케줄링 알고리즘은 그림3과 같은 환경에서 그림4와 같이 동작한다.

아래의 표1은 타임 스케줄에 사용되는 파라미터를 나타낸다..



(그림3) 깊이 5 토폴로지의 예



(그림4) PM-MAC 알고리즘의 타임 스케줄

<표1> 스케줄 파라미터

파라미터	의미
R	데이터 수신 슬롯
T	데이터 송신 슬롯
S	Sleep 슬롯
t_B	바이트 당 보내는 시간
L_{DATA}	데이터 패킷의 길이
ROUND	스케줄된 모든 슬롯이 끝나는 시간

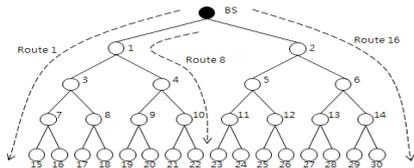
3) 루트 분할

제안하는 스케줄링 알고리즘은 경쟁을 기반으로 하는 S-MAC[2], D-MAC[3]들과는 다르게 충돌을 회피하기 위한 RTS/CTS, 백오프(Backoff), CW(Contention Window) 등을 사용하지 않는다. 오히려 이것이 전송효율과 에너지 효율을 저해할 수 있기 때문이다. 이러한 오버헤드를 발생시키지 않고 효율적인 스케줄링을 하기 위해, 즉, 그림5와 같이 각 루트(Route)를 나누는 방법을 사용한다. 전체 영역 중에서 하나의 루트에서만 전송이 이루어지게 하여 충돌을 회피하도록 한다.

본 논문에서 제안하는 방법은 최초 시작할 때에 각 센

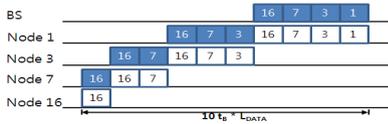
서 노드들은 RA(route advertisement) 패킷을 BS에 전송한다. RA패킷은 BS에 도착할 때까지 지나간 노드의 주소가 추가된다. 모든 노드로부터 RA패킷을 받게 되면 BS는 네트워크의 토폴로지를 알 수 있다. 이 정보를 통해 우리가 제안한 알고리즘에 따라 루트를 결정하게 된다. BS에서는 해당 루트의 정보와 노드의 위치에 따라 타임 슬롯을 할당하여 각 노드에 SA(slot assignment) 패킷을 보내게 된다. SA 패킷을 받은 노드는 자신이 할당된 타임 슬롯에 동작한다. 주기적으로 모니터링을 하는 환경에서 이러한 최초 동작이 네트워크가 구성된 다음에는 잘 일어나지 않는다.

기존 연구[1]의 스케줄링 방식은 루트를 분할하여 루트가 중복되더라도 이전에 보낸 데이터를 해당 라운드에서 여러번 보내게 되는 문제를 안고 있다. 이를 해결하기 위해 중복되는 루트에서 데이터를 보내지 않는 방식으로 스케줄을 하면, 하나의 루트 길이가 짧아지며, 위로 올라갈수록 누적되는 데이터의 양이 줄어들기 때문에 네트워크 전체의 수명을 증가시키는 효과를 볼 수 있다. 이러한 상황을 아래 그림5를 통하여 기존의 연구[1]를 살펴보면, 리프 노드의 경우 한 라운드에서 자신의 데이터를 한 번씩 전송하는 것과 달리, BS의 첫 홉의 노드들은 자신의 데이터를 8번을 보내게 된다.

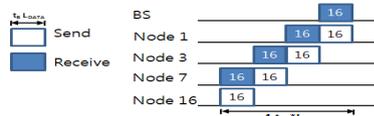


(그림5) 30개의 노드를 갖는 Balanced topology의 예

그 중, 그림5의 루트2(16-7-3-1)를 그림6을 통해 같이 기존의 연구[1]과 비교해보면, $6 * t_B * L_{DATA}$ 의 차이를 확인할 수 있다. 한 루트의 길이가 줄어들면, 같은 시간에 처리할 수 있는 데이터의 양이 늘어나며, 6개의 패킷을 줄임으로써 상위 노드에 가중되는 트래픽과 전체 네트워크의 에너지 소모를 줄일 수 있다.



(a) SEA-MAC v2의 경우



(b) PM-MAC의 경우

(그림6) 그림5에서 Route 2의 스케줄링 비교

4. 성능분석

본 장에서는 동일한 환경에서의 PM-MAC과 SEA-MAC v2[1]의 성능을 비교해 보도록 한다.

성능을 분석한 모든 토폴로지는 그림5와 같이 각 노드가 두 개의 자식 노드를 포함하여 트리의 깊이가 증가하는 환경이다. 아래의 표2는 성능 분석에 사용되는 파라미터를 나타낸다.

<표2> 성능 분석 파라미터

파라미터	의미
D_n	n번째 깊이의 노드 수
$ D_n $	토폴로지의 최대 깊이
E_B	바이트 당 소모되는 에너지
E_N	노드의 에너지 ($10000 * E_B * L_{DATA}$)
$ R_j $	토폴로지의 모든 루트 수
R_jP	j번째 루트에 보내는 패킷의 수
P	패킷의 수
L_n	n번째 깊이의 노드 수명

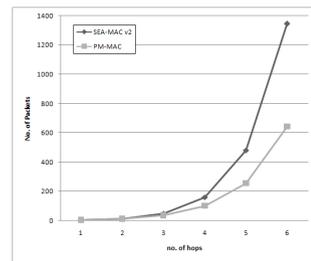
먼저 트리의 깊이가 증가하는 것에 따라 한 라운드에 모든 노드가 전송하는 패킷의 수를 계산하여 그림7과 같이 아래의 수식을 통하여 분석하였다.

$$P = |R_j| \times |D_n|! \quad (1)$$

$$P = \sum_{n=1}^{|D_n|} n \times D_n \quad (2)$$

(1)번 수식은 기존연구[1]에서의 한 라운드에 보내는 패킷의 수를 나타내며, (2)번 수식은 PM-MAC의 한 라운드에 보내는 패킷의 수를 나타낸다.

그 결과 홉의 수가 증가하는 것에 따라 모든 노드가 전송하는 패킷의 수는 증가하는데, 기존의 기존 연구[1]에 비해서 PM-MAC 프로토콜은 증가폭이 낮은 것을 볼 수 있다. 이와 같이 모든 노드가 한 라운드에 보내는 패킷의 수가 줄었다는 것은, 그만큼 에너지의 소모가 줄었다는 것을 의미한다.



(그림 7) 트리의 깊이 증가하는 것에 따른 한 라운드에 보내는 패킷의 수

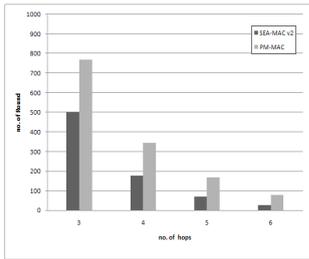
모든 노드들이 슬롯에 사용되는 에너지를 고려하지 않고, 10,000개의 데이터를 송수신할 수 있는 에너지를 보유하고 가정하였다. 이 때 BS에 첫 홉 노드의 수명을 측정하기 위해 아래의 수식을 사용하였다.

$$L_1 = E_N \div \{E_B \times L_{DATA} \times (|R_j| \div 2) \times |D_n|\} \quad (3)$$

$$L_1 = E_N \div \left\{ E_B \times L_{DATA} \times 2 \times \sum_{n=2}^{|D_n|} D_n + 1 \right\} \quad (4)$$

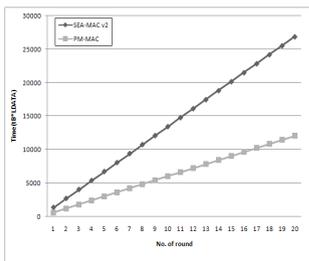
(3)번 수식은 기존연구[1]에서의 BS의 깊이 1에 노드의 수명을 나타내며, (4)번 수식은 PM-MAC의 깊이 1에 노드의 수명을 나타낸다. 각 수식은 노드의 전체 에너지를 한 라운드에 소모되는 에너지로 나누어 동작 가능한 라운드로 표현하였다.

그 결과 그림 8과 같이 깊이가 증가할수록 첫 홉의 수명이 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 홉이 증가할수록 두 알고리즘의 차이를 보면, 기존의 연구[1]에서의 경우 더 빠른 시간에 수명이 끝나는 것을 볼 수 있다. BS에 첫 홉 노드의 경우 데이터를 BS에 전달하기 위한 중요한 노드이기 때문에, 해당 노드의 수명이 끝나면 전체 네트워크가 더 이상 동작할 수 없음을 의미한다.



(그림 8) 트리의 깊이가 증가하는 것에 따른 첫 홉 노드의 수명 비교

우리는 기존의 연구[1]와 PM-MAC의 데이터 처리율을 비교하기 위해 그림5와 같은 토폴로지의 리프 노드의 깊이가 6인 환경에서 측정해 보았다.



(그림9) 라운드시간의 누적 비교

기존의 연구[1]의 한 라운드의 시간은 수식(5)와 같고, PM-MAC의 한 라운드의 시간은 수식 (6)과 같다.

$$Round = t_B \times L_{DATA} \times |R_j| \times |D_n| \quad (5)$$

$$Round = t_B \times L_{DATA} \times \sum_{j=0}^{|R_j|} \begin{cases} 3 \times (|D_n| - 1) & (R_j \geq 3) \\ 2|D_n| - 1 & (R_j = 2) \\ |D_n| & (R_j = 1) \end{cases} \quad (6)$$

측정 결과 하나의 데이터를 보내는 시간($t_B \times L_{DATA}$)을 기준으로 한 경우, 모든 노드들의 데이터가 수집되는 라운드의 시간은 그림9와 같다. 그 결과, 동일한 시간동안 기존 연구[1]에서 9번의 데이터를 수집하는데 반해, PM-MAC은 20번의 데이터를 수집하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 본 논문에서 제안한 PM-MAC의 스케줄링 알고리즘을 따르면 동일시간에 더 많은 데이터를 효율적으로 수집할 수 있고, BS의 첫 홉의 노드들에 가중되는 트래픽을 줄이는 동시에 네트워크 전체의 에너지소모를 줄일 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구방향

기존의 연구[1]에서 리프 노드의 깊이가 증가하고, 자식 노드들이 많아지면 데이터 처리율 내려가고, 상위 노드에 가중되는 트래픽으로 인하여 전체 네트워크의 수명이 줄어드는 문제가 발생하였다. 본 논문에서는 이런 문제점을 해결하기 위해 3홉 간격의 유희 타임 슬롯 사용하고, 한번 보낸 데이터를 다른 루트에 반복하여 보내지 않는 방법을 제안하였다. 그 결과 전체 네트워크에 패킷의 수가 줄어 상위 노드에 가중되는 트래픽이 줄고, 전체 네트워크의 수명이 증가했다. 또한, 한 라운드의 길이를 줄여 데이터 처리율을 높일 수 있었다.

향후 연구과제로 기존의 주기적인 모니터링 환경에서 긴급 데이터(화재 발생, 홍수 발생 등)가 발생하였을 경우 빠른 시간 안에 데이터를 전달하는 방법에 대한 향후 연구가 이루어질 예정이다.

참고문헌

- [1] M. Erazo, Y. Qian, "Analysis and Design of a MAC Protocol for Wireless Sensor Networks with Periodic Monitoring Applications", Military Communications Conference, 2007. MILCOM 2007. IEEE, 2007
- [2] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume: 12, Issue: 3, Pages:493 - 506, June 2004.
- [3] G. Lu, B. Krishnamachari, C. S. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks", Proceedings of IPDPS'2004, April 2004.
- [4] M. Erazo, Y. Qian, "SEA-MAC: Simple Energy Aware MAC Protocol for Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring", Proceedings of ISWPC'2007, San Juan, PR, February 5-7, 2007.