

무선 센서 네트워크에서 향상된 충돌 회피 기법을 이용한 TDMA 기반 MAC 프로토콜에서의 에너지 절감 방안 연구

김명보*, 김재현*, 김석규*, 이재용*
*연세대학교 전기전자공학과
e-mail : kmb01212@nasla.yonsei.ac.kr

An Enhanced Congestion Avoidance TDMA-based MAC Protocol for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Myeong-Bo Kim*, Jae-Hyun Kim*, Seog-Gyu Kim*, Jai-Yong Lee *
* Department of Electrical & Electronics Engineering, Yonsei University

요 약

무선 센서 네트워크에서 제안된 혼잡을 회피한 TDMA 기반의 MAC 프로토콜은 많은 노드에서 한꺼번에 전송할 데이터가 발생하더라도 중간에서 전달하는 노드가 타임슬롯을 소스 노드의 타임슬롯을 선택함으로써 혼잡에 의한 지연 없이 데이터를 BS(base station)으로 전달할 수 있다. 하지만, 데이터를 전달받기 위해서는 모든 타임슬롯에 걸쳐서 idle listening 을 수행하여야 하므로 에너지 소비가 크다. 본 논문은 혼잡을 회피한 TDMA 기반의 MAC 프로토콜로써 전원 제어 패킷(power control packet)을 이용하여 데이터의 전달을 이웃 노드에게 예측할 수 있도록 함으로써 노드들로 하여금 수면 모드로의 전환이 가능하게 되어 각 노드의 에너지가 절감된다.

1. 서론

무선 센서 네트워크의 다양한 응용 중의 하나는 위험한 환경에 센서를 분포하여 이에 대한 여러 가지 정보를 수집해 전송해 주는 데 있다. 이런 환경에서 재해가 발생한 경우에는 그 영역 내의 분포된 노드들이 한꺼번에 긴박한 데이터(emergency packets)를 발생하게 되므로, 동시에 발생한 이 데이터들을 혼잡으로 인한 지연 및 유실 없이 신속하게 BS(base station)으로 전달함이 중요하다. 이를 위해 TDMA 기법을 이용하여 각 노드에 데이터 전송에 대한 타임슬롯(time slot)을 할당하고, 중간에서 전달하는 노드들은 자신의 타임슬롯이 아닌 데이터를 발생시킨 source 노드의 타임슬롯을 통해 데이터를 전달한다면, 지연 없이 데이터를 전송할 수 있다[1]. 하지만, 이 경우 노드들이 모든 타임슬롯에 걸쳐 수신 모드를 유지해야 하므로, idle listening 으로 인한 에너지 소모가 크게 발생한다. 본

논문에서는 이에 대한 에너지 낭비를 최소화 하기 위한 개선된 APC(Adaptive Power Control) MAC 프로토콜을 제안하고, 이에 대한 분석을 통해 그 성능 개선을 확인한다.

2. 관련 연구

2-1. 경쟁 기반과 TDMA 기반의 MAC

현재 무선 센서 네트워크에서의 MAC 프로토콜은 크게 두 가지 방향으로 전개되고 있다. 경쟁(contention)기반과 TDMA 기반의 MAC 프로토콜이 그것이다. 경쟁 기반에서의 대표적인 프로토콜인 S-MAC 과 T-MAC 은 802.11 에서의 MAC 프로토콜과 유사하게 동작하며, 하나의 프레임은 활성 및 수면구간으로 나누며, duty cycle 로써 활성구간을 조절함으로써 에너지소비를 줄여 노드의 수명을 연장시킨다[2][3].

TDMA 기반의 MAC 프로토콜은 각 노드마다 전송

할 수 있는 타임 슬롯을 정해두고, 여기서만 데이터를 전송할 수 있게 한다. 따라서, 경쟁기반의 MAC 프로토콜에 비해 충돌이 적으며, RTS/CTS 같은 패킷이 필요하지 않으므로 오버헤드가 적다는 장점이 있다. 하지만, 하나의 cell 을 대표하는 클러스터(cluster)간의 통신을 관리하는 것이 쉽지 않고, 다이내믹한 센서 네트워크의 토폴로지 변화에 적응(scalability)하기 힘들다는 단점이 있다[4][5]. 그 중 하나인 BMA MAC 은 전송하고자 하는 노드가 해당하는 bit 에 설정하면, 이를 바탕으로 클러스터 헤드가 전송할 타임슬롯을 결정하여 이를 cell 내의 모든 노드들에게 알려준다. 따라서 한 세션 내에서 전송되는 데이터가 있는 동안만 필요한 노드의 전원이 켜지며, 이후 나머지 기간 동안은 모든 노드의 전원이 꺼지게 함으로써 에너지소비를 줄이도록 하였다[6].

2-2. ECCA[1]

ECCA 는 평상시 환경에서는 각 노드가 cellular mode 를 이용하여 BS 로 데이터를 바로 전송하지만, 재해가 발생하여 직접 BS 로의 데이터 전송이 불가능해지면, ad-hoc mode 로 전환하여 이웃 노드를 통해 BS 로 전달한다. 이 때에는 비상 데이터가 많은 노드에서 발생하므로 이를 혼잡에 의한 지연 없이 전송하기 위하여 TDMA 방식을 이용한다. 하지만, 일반적인 TDMA 와는 달리 소스 노드에서 발생한 데이터를 중간 노드에서 전달할 때는 자신의 타임슬롯이 아닌 소스 노드의 타임슬롯을 이용한다. 이렇게 함으로써 동시에 많이 발생한 데이터를 지연 없이 기대하는 시간에 전달할 수 있게 된다. BS 는 응답 패킷을 동일한 타임슬롯을 통해 보내줌으로써 소스 노드가 패킷이 정상적으로 전달됨과 타임슬롯이 비었다는 것을 알게 되어 다음 데이터를 보낼 수 있도록 한다.

3. APC MAC 프로토콜

3-1. 문제 제기

앞에서 언급한 바와 같이 ECCA MAC 프로토콜은 시급한 데이터를 혼잡에 의한 충돌 없이 목적지로 정해진 프레임(frame)시간에 보낼 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 소스 노드의 타임슬롯을 이용하여야 하므로 중간에 전달하는 노드들이 모든 타임슬롯에 걸쳐 수신 모드를 유지하여야 하므로, idle listening 으로 인한 에너지 낭비요소가 발생하게 된다. 하지만, 데이터를 중간에서 전달하는 시점을 자신의 이웃 노드로부터 미리 알 수만 있다면, 불필요한 idle listening 을 방지할 수 있을 것이다. 이러한 점을 고려하여 본 논문에서 제안하는 APC(Adaptive Power Control) MAC 프로토콜은 혼잡에 의한 지연과 충돌을 방지하며, 여기에 에너지 소모 또한 절감할 수 있도록 한다.

3-2. APC MAC 프로토콜 동작 알고리즘

그림 1 은 하나의 cell 에 4 개의 노드가 존재하며, BS로부터 1 홉과 2 홉인 노드가 1 개씩이며, 3 홉인 노

드가 2 개일 때 프레임의 구성과 데이터 전송 과정을 표현하였다. APC MAC 프로토콜은 각 슬롯에서 데이터 전송 전에 이후 전송될 데이터에 대한 슬롯 정보가 들어 있는 전원 제어 패킷(power control packet)을 보내게 된다.

각 노드는 평소에는 모든 타임슬롯에 대하여 수신 모드로 하지 않고, 자신보다 1 홉 큰 노드에 해당되는 타임슬롯에서만 수신모드를 유지하고, 나머지 타임슬롯에서는 수면 모드를 유지한다. 또한, 자신의 타임슬롯에서는 전송할 데이터가 있을 경우가 아니면 항상 수면 모드이다.

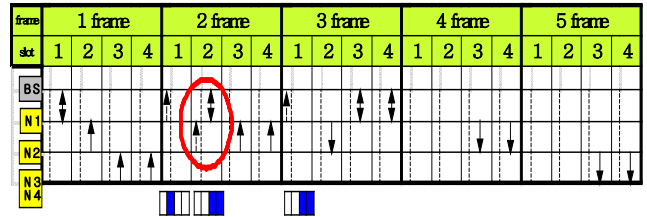


그림 1 APC MAC 프로토콜에서의 패킷 전송

그림 1 을 살펴보면 이웃 노드는 데이터를 수신할 때 점선으로 표현된 제어 패킷을 통해 이후 전송될 데이터의 타임슬롯을 표시해 준다. 아랫부분에는 제어 패킷의 설정을 나타내었다. 제어 패킷은 비트(bit) 단위로 이루어져 있으며, 각 비트는 데이터가 전송될 타임슬롯을 가리킨다. 제어 패킷을 받은 노드는 제어 패킷에 해당되는 타임슬롯에서 수면 모드에서 수신모드로 전환하여 데이터를 이웃 노드로부터 수신하게 된다. 이런 동작은 각 노드가 임의의 타임슬롯으로 할당되더라도 정상적으로 동작한다. 이 제어 패킷의 전달을 위한 구간을 기존의 데이터상에 포함시키지 않고 따로 놓는 이유는 하나의 노드에서 패킷의 전송이 동일한 프레임 내에서 자신의 노드와 이웃의 노드에서 발생할 경우를 대비한 것이다. 이 경우 현재 노드보다 한 홉 적은 노드에서의 전송데이터와 제어 패킷과의 충돌이 발생하므로 이를 피하기 위해 제어 패킷 전달을 위한 구간을 따로 만든다. 이 경우를 그림 1 의 붉은 색의 굵은 원으로 표시하였다.

데이터 전달 시 고려할 사항은 제어 패킷을 수신할 때 타임슬롯이 소스 노드의 타임슬롯과 비교하여 데이터 수신을 현 프레임에서 할 것인지 다음 프레임에서 할 것인지를 결정하는 것이다. 이는 제어 패킷을 송신하는 노드에서도 마찬가지로 동작하므로 송수신의 동기를 맞출 수 있다.

4. 성능 분석 및 평가

4-1. 각 노드의 POWER 천이 분석

우선, 모든 노드에서 데이터 전송이 없는 경우를 생각하면, APC MAC 프로토콜을 적용 하지 않을 경우에는 마지막 홉의 노드를 제외한 모든 노드가 모든 타임슬롯에서 수신 상태이어야 한다. 이에 비해 APC MAC 을 적용하면 이웃 노드에 대해서만 수신 상태를 유지하기 때문에 소모전력이 1/3 로 줄어들며, 이를 수

식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{nodata} = \text{node 수} \times P_{Rx} \quad (1)$$

n 홉 노드에서 데이터가 발생하게 되면, (n-1)홉 노드로는 바로 전송이 되며, (n-1)홉의 노드는 (n-2)홉에게 전원 제어 패킷을 미리 보내줌으로써 이것이 가리키는 타임슬롯에서 수신할 수 있도록 해준다. 송신한 n 홉 노드는 (2n-1) 프레임 후에 BS 로부터 응답 패킷이 도착함을 미리 예측할 수 있으므로, 이 때까지는 수면 모드를 유지할 수 있다.

4-2. 네트워크 에너지 소비 분석

파라미터	설명
N	전체 노드 수 ($N_{hop1} + N_{hop2} + N_{hop3}$)
$N_{hop1}, N_{hop2}, N_{hop3}$	각 홉에 대한 node 수
P_{Tx}, P_{Rx}	T_x, R_x 시 전력 소모
P_{trans}	$P_{Tx} + P_{Rx}$

표 1 에너지 소비 분석을 위한 파라미터

표 1 은 네트워크 상에서의 에너지 분석에 사용되는 파라미터들을 정리한 것이다. 그림 2 와 같이 셀 내에 3 홉까지의 네트워크가 구성되어 APC MAC 프로토콜을 적용하였을 때 전체 노드에서 데이터의 전송이 발생하는 경우의 네트워크상 전력 소모를 각 프레임 별로 다음과 같이 분석하였다.

- frame 1:

$$N \times (P_{Tx} + P_{Rx}) \quad (2)$$

- frame 2,3:

$$(N - N_{hop1}) \times (P_{Tx} + P_{Rx}) + N_{hop1} \times P_{Rx} \quad (3)$$

- frame 4,5:

$$N_{hop3} \times (P_{Tx} + P_{Rx}) + (N_{hop1} + N_{hop2}) \times P_{Rx} \quad (4)$$

이에 따른 APC MAC 프로토콜에서의 전체 소비전력은 다음과 같다.

$$P_{APC} = (3 \times N - 2 \times N_{hop1} + 2 \times N_{hop3}) \times P_{trans} + (4 \times N_{hop1} + 2 \times N_{hop2}) \times P_{Rx} \quad (5)$$

여기서, 제어 패킷의 전송시의 소비전력은 제어 패킷이 노드수에 따라 bit 단위로 구성되어 데이터에 비해 매우 작으므로 무시하였다.

이제, APC MAC 프로토콜로 인하여 절약되는 에너지를 각 프레임별로 알아보면 다음과 같다.

- frame 1:

$$\{(N - N_{hop1}) + N_{hop3} + N_{hop1}\} \times P_{Rx} \quad (6)$$

- frame 2:

$$\{N_{hop3} + N_{hop1} + (N - N_{hop3})\} \times P_{Rx} \quad (7)$$

- frame 3:

$$\{N_{hop2} + N_{hop1} + (N - N_{hop2})\} \times P_{Rx} \quad (8)$$

- frame 4:

$$\{(N - N_{hop1}) + N_{hop1} + (N - N_{hop3})\} \times P_{Rx} \quad (9)$$

- frame 5:

$$\{(N - N_{hop1}) + (N - N_{hop2}) + (N - N_{hop3})\} \times P_{Rx} \quad (10)$$

여기서 절약되는 에너지는 다음과 같다.

$$P_{SAVE} = (7 \times N + 2 \times N_{hop1}) \times P_{Rx} \quad (11)$$

또한, 위 식들은 3 홉 네트워크를 구성하는 모든 토폴로지에 적용될 수 있다.

타임슬롯 전 구간에서 idle listening 하는 것에 대한 APC MAC 프로토콜의 상대적인 전력 소모 비율은 다음과 같다.

$$P_{rate} = \frac{P_{APC}}{P_{APC} + P_{SAVE}} \quad (12)$$

4-3. 성능 평가

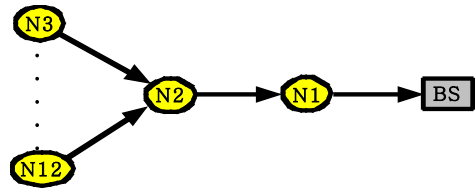


그림 2 에너지 분석을 위한 네트워크 토폴로지

APC MAC 프로토콜의 성능 평가를 위해서 그림 2 와 같은 간단한 네트워크 토폴로지를 구성하였다. 다른 홉에 해당하는 노드 수는 한 개로 하고, 각 홉의 노드수를 증가시켜 그 성능을 확인하였다.

센서 모듈에서 수신: 송신: 수면 모드에서의 전력 소모 비율은 1:1.833:0.001 로 생각한다면[2], 수면 모드에서의 전력 소모는 없는 것으로 간주해도 된다.

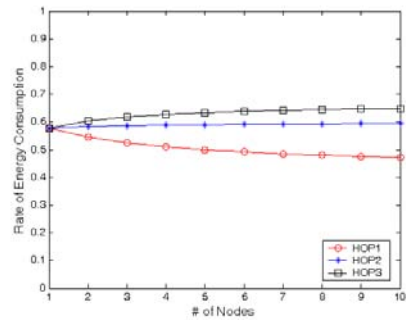


그림 3 APC MAC 의 에너지 개선 효과

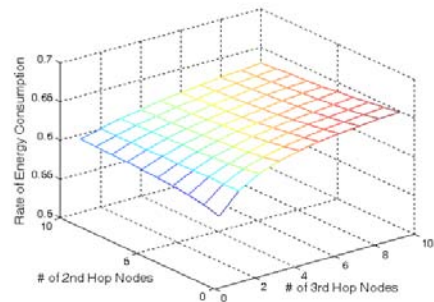


그림 4 홉 2 와 홉 3 노드의 가변에 대한 에너지

그림 3 와 4 는 식 (12)에 따라 기존의 전원 제어를

하지 않은 MAC 과 APC MAC 과의 상대적인 에너지 소모율을 나타내었다. 결과에서 명확히 보여지듯이, 적게는 35%이상의 에너지 절감 효과를 보여주고 있으며, 홉 1 의 노드수가 많을수록 50%이상의 에너지 절감 효과의 성능개선을 보여준다.

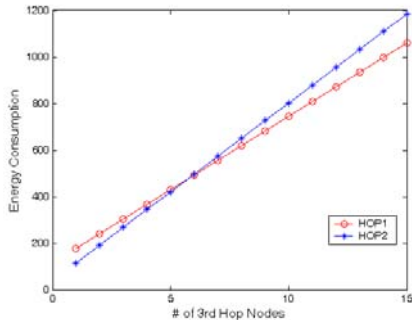


그림 5 홉 1 과 홉 2 의 소비전력

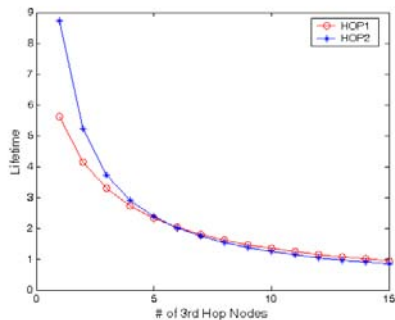


그림 6 홉 1 과 홉 2 노드의 수명

그림 5 과 6 은 홉 3 의 노드수 증가에 따른 홉 1 과 2 의 노드가 소비하는 전력과 그 수명을 나타내었다. 여기서 살펴보면, 홉 3 의 노드가 증가함에 따라 홉 2 의 소비전력이 홉 1 을 능가함을 알 수 있다. 하지만, 이 경우는 홉 1 과 홉 2 의 노드수를 하나로 고정하였을 경우이며, 실제 홉 2 의 노드수를 늘리게 되면 홉 1 의 소비전력이 높아진다. 가장 마지막 홉에 있는 노드들을 제외하고, 중간에서 전달하는 노드들의 경우 토폴로지에 따라서 소비되는 전력이 상대적으로 다르기 때문에 네트워크 전체의 수명을 균일하게 유지할 수 있게 된다. 따라서, APC MAC 프로토콜은 BS 에 가까운 노드의 수명이 짧아진다는 기존의 MAC 프로토콜의 단점 또한 상당히 보완할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 계획

일반적으로 센서 네트워크에서는 에너지 효율적인 측면과 데이터 전달상의 지연 문제는 서로 trade-off 관계를 가진다. 하지만, 여기서 제안하는 APC MAC 프로토콜은 많은 노드에서 전송할 데이터가 발생 하더라도 시급한 정보를 결정된 시간에 지연 없이 전송할 수 있으며, 게다가 이웃 노드간에 간단한 전원 제어 패킷을 활용하여 에너지 효율적인 측면에서도 탁월한

효과를 발휘함을 알 수 있다. 그리고, 네트워크내의 각 노드로 하여금 전체적인 에너지 소비를 균일하게 하여 특정 홉이나 위치의 노드들의 수명이 급속히 단축되지 않도록 한다.

앞으로 좀 더 실제적인 네트워크 상황에서 정확한 분석을 위하여 센서 모듈에 APC MAC 프로토콜을 적용할 것이다. 또한, 기존의 S-MAC, T-MAC, 그리고, TDMA 기반의 MAC 프로토콜을 구현하여 데이터 발생 비율에 따라 소모되는 전력뿐 아니라, 지연시간도 비교, 분석할 것이다. 그리고, 열악한 환경에서 전송하는 과정에서 발생하는 에러로 인한 재전송시에 야기되는 지연과 에너지 소모에 관한 프로토콜의 보완 및 다양한 연구도 필요할 것이다.

참고문헌

[1] Takahiro Fujiwara, Takashi Watanabe, "An Ad-hoc Networking Scheme in Cellular Networks for Emergency Communications," The 8th World Multiconference on Systematics, Cybernetics and Informatics 2004 (SCI2004), Vol. 14, pp.23-28, July 2004.

[2] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estin, "Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," USC/ISI Technical Report ISI-TR-567, January 2003.

[3] Tijs van Dam, Koen Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, Sensys'03, November 2003.

[4] Guangyu Pei, Charles Chien, "Low Power TDMA in Large Wireless Sensor Networks" Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force. IEEE, Volume 1, pp.28-31, October 2001.

[5] Z. Chen, A. Khokhar, "Self Organization and Energy Efficient TDMA MAC Protocol by Wake Up for Wireless Sensor Networks", IEEE International Conference on Sensors and Adhoc Communication and Networks(Secon 2004), October 2003.

[6] Jing Li, Lazarou, G.Y., "A Bit-Map-Assisted Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks", Information Processing in Sensor Networks, 2004. ISPN 2004. Third International Symposium on, pp. 55-60, 26-27 April 2004.