

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율성과 전송 지연 최소화를 동시에 고려한 MAC 프로토콜

송영미^o, 서창수, 고영배
 아주대학교 정보통신전문대학원
 ymsong@ajou.ac.kr^o, {scs, youngko}@ajou.ac.kr

MAC Protocol for achieving energy efficiency and end-to-end delay minimization in wireless sensor networks

Young-Mi Song^o, ChangSu Suh, Young-Bae Ko
 Graduate School of Information and Communication, Ajou University

요 약

지금까지 무선 센서 네트워크에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 많은 라우팅 및 MAC 프로토콜들이 개발되어 왔다. 특히 에너지 효율적 센서 MAC 프로토콜들 중 Sensor-MAC (S-MAC) 프로토콜은 listen 시간과 sleep 시간을 주기적으로 반복하여, 데이터 전송이 없을 경우 노드의 통신 모듈을 sleep시킴으로써 그 만큼의 에너지를 절약한다. 노드의 sleep시간이 길수록 더 많은 에너지를 절약할 수 있으나, 대신 sleep시간에 발생된 데이터는 다시 다음 주기의 listen시간이 시작될 때까지 지연되어야 한다는 단점이 있다. 이러한 데이터 전송 지연은 센서 네트워크에서 다양한 어플리케이션을 지원하기 위해 반드시 개선되어야 할 사항이다. 본 논문에서는 S-MAC의 listen/sleep 주기를 그대로 사용하여 에너지를 절약하면서도, 큰 오버헤드를 발생시키지 않고 데이터 전송시의 지연 시간을 최소화하는 기법에 대해 논의한다. 또한 시뮬레이션을 통해 기존의 S-MAC 및 Adaptive S-MAC 프로토콜과 지연시간 및 에너지 소비량을 비교하여, 제안된 기법이 지연시간을 감소시키면서도 기존 MAC 프로토콜들과 비슷한 에너지 소비량을 갖는다는 것을 증명하였다.

1. 서 론

Ad-Hoc 통신 기술과 더불어 무선 센서 네트워크 통신 기술은 최근 관심이 집중되고 있는 유비쿼터스 컴퓨팅 시대의 핵심 기반기술로서 그 중요성이 점차 대두되고 있다. 센서 네트워크는 센싱 기능과 함께 통신 기능을 가진 수많은 초소형 스마트 센서들로 이루어진다. 또한 낮은 데이터 발생률, Global ID의 부재, 낮은 신뢰성 등 다른 무선 네트워크와 구별되는 독특한 특징을 가진다[1]. 센서 노드는 전력, 메모리, 컴퓨팅 능력 등 매우 제한적인 자원을 가진다. 특히 각 센서 노드는 대체가 불가능한 배터리에 의존할 수 밖에 없기 때문에, 전력 자원은 네트워크의 지속시간을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 따라서 한정된 에너지 자원을 효율적으로 사용하기 위한 많은 MAC 및 Routing 프로토콜들이 개발되어 왔다.

Sensor-MAC (S-MAC) 프로토콜은 센서 네트워크에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 listen/sleep 시간을 주기적으로 반복한다. listen 시간 동안 데이터를 전송하고자 하는 노드는 Collision을 방지하기 위해 목적(destination) 노드와 RTS, CTS를 교환하고, 그 외의 노드는 다음 listen시간까지 sleep함으로써 에너지를 절약한다. sleep 시간이 길수록 센서 노드는 더욱 많은 에너지를 절약할 수 있으나, 그만큼 데이터 전송시의 지연 시간이 증가한다는 단점이 있다. 예를 들어 <그림 2>와 같이 노드 A가 노드 F에게 데이터를 전송하길 원한다고 가정하자. 이를 위해 노드 A는 먼저 노드 B에게 데이터를 전송하고, 이 주기 동안 노드 C는 데이터 송수신에 참여하지 않으므로 sleep 모드로 돌입한다. 노드 B는 받은 데이터를 다시 노드 C에게 전송해야 하나, 노드 C는 현재 통신 모듈을 끈

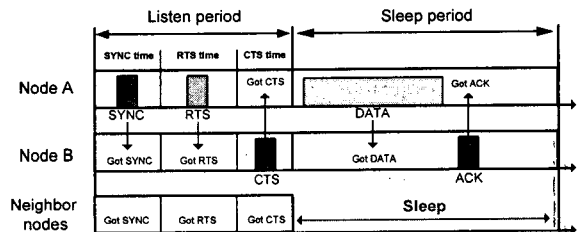


그림 1. S-MAC

sleep 상태이므로 노드 B는 다시 모든 노드가 깨어나는 listen 시간이 될 때까지 데이터 전송을 지연시킬 수 밖에 없다. 따라서 SYN interval 즉 listen 시간과 sleep 시간을 합한 한 주기가 1초라고 한다면, 노드 A로부터 노드 F까지 데이터가 도달하는 데 5초의 지연 시간이 걸린다.

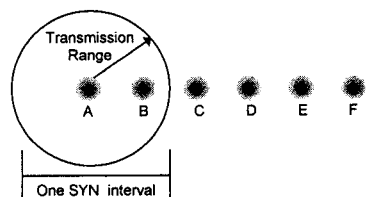


그림 2. 데이터 전송 지연

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음

이러한 데이터 전송 지연은 의료 및 군용장비 등 짧은 시간 내에 데이터가 전송될 필요가 있는 어플리케이션을 위해 반드시 개선되어야 할 사항이다. 그러나 이를 위해 단순히 전체 duty cycle을 높인다면, sleep 시간이 짧아져 데이터 전송 지연은 감소하겠지만 대신 데이터가 발생되지 않을 때에도 에너지 소모가 커져 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 carrier sensing range를 사용하여 데이터가 발생할 경우에만 duty cycle을 조절함으로써, 효율적으로 에너지를 소비하면서도 데이터 전송 지연을 최소화할 수 있는 기법을 제안한다.

2. 관련 연구

<그림 3>은 데이터 전송 지연을 최소화하기 위해 adaptive listen 시간[3]을 도입한 S-MAC의 동작 과정을 설명하고 있다. 기존 S-MAC에서는 sleep time동안 한번의 데이터 전송이 완료된 후에는 다음 주기의 listen time이 시작되기 전까지 다른 노드에게 데이터를 보낼 수 없다. 이를 보완하기 위해 RTS, CTS를 받아 NAV를 설정한 이웃 노드들이 데이터 전송이 끝나는 시간이 맞추어 다시 깨어나도록 하고, 이때 깨어난 노드들 사이에 다시 RTS, CTS 교환이 가능하도록 adaptive listen 시간을 두었다. 그럼으로써 다음 listen time까지 기다리지 않고도 데이터를 전송할 수 있다. 그러나 listen time동안 전송되는 RTS, CTS를 들은 노드들만 (<그림 3>에서 노드 C) adaptive listen에 참여할 수 있기 때문에, 데이터 전송 지연의 감소는 소스 노드로부터 최대 2홉까지라는 한계점이 있다. <그림 3>에서 노드 C는 노드 B의 CTS를 듣고 NAV를 설정하여 adaptive listen시간에 참여할 수 있으나, 어떠한 컨트롤 패킷도 들지 못한 노드 D는 다음 주기의 listen time이 될 때까지 계속 sleep 상태에 있게 된다.

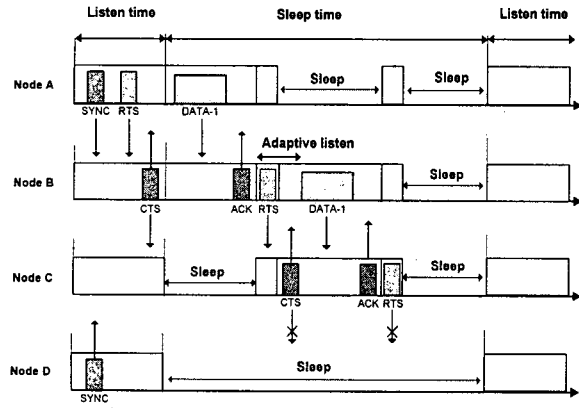


그림 3. Adaptive listen

일반적으로 센서 네트워크에서 발생한 데이터 트래픽은 multi-hop을 통해 소스 노드로부터 sink 노드로 전달되기 위한 것이 대부분이다. 따라서 노드와 노드 간 데이터 전송 지연의 감소보다는, 라우팅 경로를 따라 sink 노드로 향하는 multi-hop 데이터 전송시의 end-to-end 지연 시간을 감소시키는 것이 더욱 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 carrier sensing range를 이용하여 한 SYNC interval 내에서 전송 가능한 홉 수의 범위를 증가시키는 다음의 두 알고리즘을 제안한다. 제안된 두 알고리즘은 데이터를 센싱한 소스 노드가 sink노드로 데이터를 전송하는 경우를 가정하였으며, 네트워크 내의 모든 노드들이 서로 동기화를 맞춘다고 가정하였다. 센서 네트워크에서 전체 네트워크의 동기화를 가정한 논문으로는 [5][6]가 있다.

3.1 스킴 1

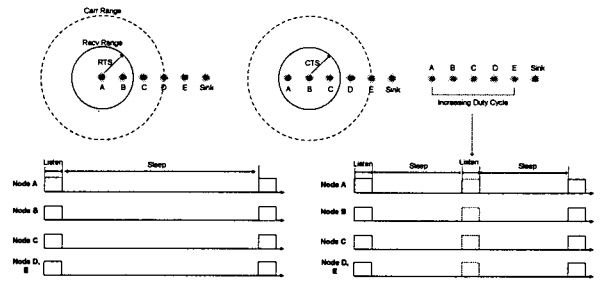


그림 4. 제안 스킴 1

<그림 4>에서 보는 바와 같이 노드 A가 sink 노드에게 데이터를 전송하고자 할 때 먼저 노드 A는 RTS를 노드 B에게 전송하고 이어 노드 B는 CTS를 전송한다. Carrier sensing range는 실제 데이터 전송 범위보다 두 배 정도 큰 값을 가진다. 따라서 노드 D, E는 RTS, CTS 패킷을 전송 받을 수는 없지만 carrier는 감지할 수 있다. 제안된 스킴 1은 Listen 주기 동안 발생하는 RTS, CTS의 Carrier를 감지한 모든 노드들이 sleep 모드로 들어가기 전에 자신의 duty cycle을 증가시키는 것이다. 그럼으로써 한 SYNC interval 동안 데이터를 전송할 수 있는 홉수의 범위를 증가시킬 수 있다. <그림 4>에서 노드 D, E는 기존 sleep 시간을 반으로 줄였고, 따라서 노드 C가 노드 D, E로 데이터를 전송하는 데 걸리는 지연 시간을 감소시킬 수 있다. duty cycle을 증가시킨 노드 D, E는 duty cycle을 증가시키지 않아 sleep모드에 있던 다른 노드들이 깨어나는 다음 주기의 listen 시간이 되면 다시 원래의 duty cycle을 회복한다.

3.2 스킴 2

제안된 스킴 1은 listen 주기에서 전송된 RTS, CTS의 carrier를 감지한 모든 노드들이 자신들의 duty cycle을 증가시키는 것이 때문에, 라우팅 경로상에 위치하지 않는 노드도 duty cycle을 증가시킬 수 있다. 이러한 불필요한 에너지의 낭비를 줄이기 위해 스킴 2에서는 CTS가 전송되는 영역쪽의 노드들만 duty cycle을 증가시킨다. 이를 위해 listen 시간 동안 감지한 두 개의 carrier 신호의 세기를 비교하고, 두 번째 carrier 신호의 세기가 큰 노드들만 duty cycle을 증가시킨다. <그림 5>와 같은 네트워크 토폴로지에서 스킴 1의 경우에는 노드 Z, X, Y도 duty cycle을 증가시키지만, scheme 2의 경우에는 sink로 향하는 경로상에 위치한 노드 C, D, E만 duty cycle을 증가시킨다. 그럼으로써 스킴 1보다 에너지를 더욱 절약할 수 있다. 그러나 스킴 2에서는 RTS나 CTS 중 어느 하나의 carrier만 감지한 노드일 경우 duty cycle을 증가시키지 않기 때문에, 라우팅 경로상에 위치한 노드가 duty cycle을 증가시키지 않

3. 데이터 전송 지연을 최소화하는 MAC 프로토콜

는 경우도 발생한다. <그림 5>에서 노드 E는 CTS의 carrier만 감지할 수 있기 때문에 duty cycle을 증가시키지 않는다.

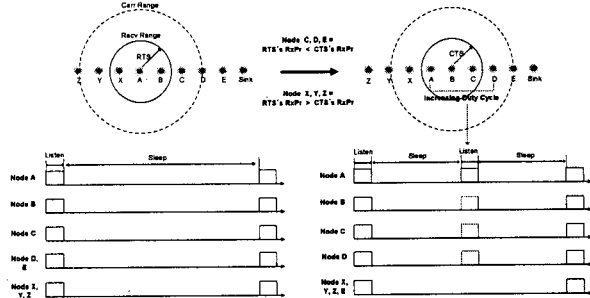


그림 5. 제안 스킴 2

4. 시뮬레이션 및 성능 평가

제안 알고리즘의 성능 평가를 위해서 본 논문에서는 NS-2[8] 시뮬레이터를 통해 다양한 멀티 홉 환경에서 4가지 통신 기법(기본 S-MAC[2], Adaptive S-MAC[3], 제안 스킴 1, 제안 스킴 2)의 성능을 측정하였다. 노드들은 30m 간격의 nxn 격자(grid) 형태로 배열되며, 데이터(100Kbytes)는 5초 간격으로 랜덤하게 선택된 노드에 의해 발생된다. 발생된 데이터는 Greedy 라우팅[7] 기법으로 미리 정의된 sink 노드 (필드 중앙에 위치)에게 전달된다. 우리는 다양한 멀티 홉 환경에서의 시뮬레이션을 위해 nxn의 노드 수를 변화 시키며 4가지 통신 기법의 평균 전송 지연 시간 및 노드들의 총 에너지 소모량을 측정하였다. NS2 시뮬레이션에서 사용한 Rx threshold 파라미터는 $3.652e-10(40m)$ 로, Cs threshold 파라미터는 $8.136e-11(80m)$ 로 데이터 전송 범위를 정의하였다. 그리고, 에너지 소모 모델은 [3] 논문을 참고하여, 초당 송신 시 (24.75mW), 수신 시(13.5mW), sleep 시(1.5μW)의 에너지를 소비하도록 설정했다.

<그림 6>는 다양한 멀티 홉 환경에서 4가지 통신 기법의 평균 전송 지연 시간의 결과를 보여준다. 본 논문에서 제안한 스킴 1은 기본 S-MAC에 비해 72%, Adaptive S-MAC에 비해 38% 정도의 전송 지연 감소 효과를 보이며, 스킴 2는 기본 S-MAC에 비해 64%, Adaptive S-MAC에 비해 19% 정도의 전송 지연 감소 효과를 보인다. 스킴 2는 두 번의 캐리어 센싱(RTS와 CTS) 세기 값을 비교하기 때문에, 만약 CTS 패킷만을 받을 경우에는 duty cycle의 조절 여부를 판단하기 어렵다. 따라서 전송 지연의 감소는 스킴 2보다 스킴 1이 더욱 높은 성능을 보인다. 그러나 <그림 7>에서 보는 바와 같이 소비 에너지량은 sink로 향하는 경로상에 위치한 노드들만 duty cycle을 조절하는 스킴 2가 스킴 1보다 더 작다. <그림 6, 7>을 통해, 본 논문에서 제안하는 MAC 프로토콜이 S-MAC과 거의 비슷한 에너지를 소비하면서도 데이터 전송시의 지연시간을 더욱 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 연구된 에너지 효율적 센서 MAC 프로토콜이 갖는 가장 큰 문제점 중의 하나인 멀티 홉 환경에서의 데이터 전송 지연 문제를 개선하기 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다. 우리는 S-MAC과 유사한 에너지를 소비하면서도 데이터 전송 시의 지연 시간을 감소시킬 수 있는 2가지 스킴을 제안하였고, NS2 시뮬레이터를 통해 제안된 MAC 프로토콜의 성능을 증명하였다. 향후 과제로는 cross layer 즉 MAC layer에서 라우팅 정보를 이용하여 라우팅 경로상에 위치한 노드들만 duty cycle을 조절함으로써 더욱 소비 에너지량을 줄일 수 있는 방안에 대해 연구할 계획이다.

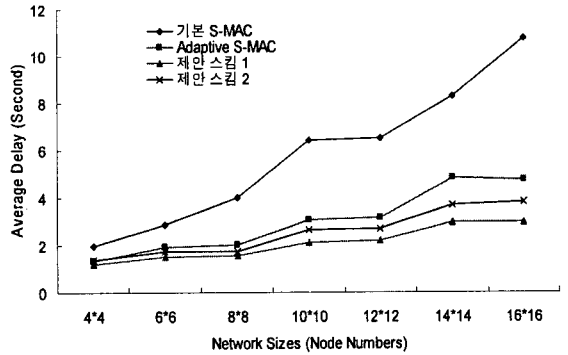


그림 6. 멀티 홉 환경에서의 평균 전송 지연 시간 측정.

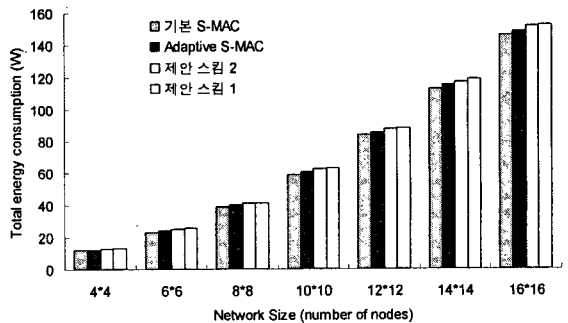


그림 7. 멀티 홉 환경에서의 총 소비 에너지 측정.

[참고 문헌]

- 1) I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci "Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Aug. 2002.
- 2) W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *IEEE INFOCOM 2002*.
- 3) W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin "Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, June 2004.
- 4) P. Lin, C. Qiao, and X. Wang "Medium Access Control with A Dynamic Duty Cycle For Sensor Networks," in *IEEE WCNC, Mar 2004*.
- 5) Q. Li and D. Rus, "Global Clock Synchronization in Sensor Networks," in *IEEE INFOCOM, mar. 2004*.
- 6) J. Elson, L. Girod and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," in *OSDI, Dec. 2002*.
- 7) B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Sensor Networks," *Proc. ACM MobiCom 2000*.
- 8) The CMU Monarch Project, "The CMU Monarch Project's Wireless and Mobility Extensions to NS."