IEEE 802.15.4 MAC의 backoff 범위의 확장에 대한 성능 평가

고정길°, 김동주, 김효곤
고려대학교 정보통신대학 컴퓨터학과
{jgko, poohdj, hyogon}@korea.ac.kr

Performance evaluation of extended backoff range in IEEE 802.15.4 MAC

Jeong-Gil Ko°, Dongju Kim, Hyogon Kim
Department of Computer Science and Engineering
College of Information and Communication, Korea University

요 약

IEEE 802.15.4 MAC은 센서 네트워크와 같은 저속, 저 전력 통신을 지원하기 위해 설계 되었다. 하지만 현재의 IEEE 802.15.4 MAC은 센서가 촘촘히 분포한 상황과 같이 충돌이 많이 발생하는 경우를 지원하기엔 부족하다. 우리는 현재의 IEEE 802.15.4 표준이 backoff 범위를 너무 좁은 범위로 제한하여 더 많은 충돌을 야기한다는 것을 밝힌다. 또한 본 논문을 통해 단순히 backoff의 범위를 넓혀 주는 것만으로도 IEEE 802.15.4 MAC으로 하여금 충돌에 대한 탄력성을 보강시키고, 더 나아가 추가적인 최적화 알고리즘을 도입하더라도 기존의 표준 MAC보다 효과적으로 반응하게 함을 보인다.

1. 서 론

IEEE 802.15.4 표준[1]은 센서 네트워크와 같은 응용에서 널리 사용되고 있는 저속, 저 전력 무선 통신을 위한 MAC (Medium Access Control) 계층과, PHY (Physical) 계층의 표준을 정의한다. 하지만 본 논문에서 우리는IEEE 802.15.4 MAC은 충돌이 많이 일어나는 상황에서는 정상적으로 작동하지 않는 다는 것을 보인다. 즉, IEEE 802.15.4 MAC의 표준은 많은 수의 노드, 또는 각 노드가 경쟁적으로 medium을 차지하려는 상황에서 쉽게 안정성을 잃는 다는 것을 보인다. 이는 센서가 촘촘히 분포하는 상황과 같은 응용에서 802.15.4를 기반으로 하는 시스템의 문제점을 지적한다. 우리는 이 문제점의 원인은 표준에서 지나치게 적은 범위에서 backoff가 가능토록 한데에 있다고 판단한다. 본 논문에서는 backoff의 범위를 유동적으로 완화함으로서 높은 충돌 확률이 유지되는 상황에서도 IEEE 802.15.4 MAC의 탄력성을 위지하고, 성능을 개선하는 효과가 있음을 보인다.

지금까지 IEEE 802.15.4 MAC에 대한 연구는 IEEE 802.15.4 MAC의 표준의 성능을 분석하는 범위에서 이루어 졌다 [2]-[7]. 하지만 몇 연구는 MAC을 수정하는 방식을 통해 성능을 향상시켰다 [8],[9]. [8]에서는 표준에서 벗어난 backoff값을 노드에 할당하는 방식을 제안하였지만, 이는 channel 상황이 좋은 노드에게 낮은 backoff 값을 할당하는 방식을 택했다. 이는 fairness를 희생함으로서, 네트워크 전체의 throughput을 향상시키는 방식이다. [9]에서는 backoff 범위를 수정하지 않고 backoff 알고리즘 자체를 수정하였다. Backoff에 직접적으로 관여하는 backoff exponent (BE) 값을 beacon을 걸쳐서 기억되게 하여 채널 상황에 BE 값이 잘 적응 하도록 하였다. 또한 BE 값을 성공적인 전송이 한번 이루어지자마자 *macMinBE* (BE의 초기 값)로 돌려놓지 않고, 성공적인 전송이 이루어 질 때 마다 한 단계 씩 감소시키는 방식을 택했다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 성능저하의 원인을 좁게 설정된 backoff 범위로 판단하고 이를 보인다. 이에 이어 aMaxBE의 값을 표준의 5보다 큰 값으로 수정할 경우에 throughput, 전력 소모량, 지연 등의 수치들이 눈에 띄게 향상됨을 보인다. 또한, 우리의 수정 사항을 이용한 MAC은 [9]와 같은 알고리즘 적인 수정에 훨씬 효과적으로 반응한다는 것을 보인다.

2. Backoff 범위의 확장

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 MAC의 non-Beacon enabled 방식의 경우는 에너지 효율을 고려하지 않아 기본적으로 센서네트워크에 활용이 어렵다고 판단하여, IEEE 802.15.4 MAC의 Beacon-enabled 방식만을 고려

한다. Beacon은 여러 센서들을 총괄하는 coordinator가 보내는 정보로 전송에 있어서 필요한 세부정보를 포함한다. 이 정보들은 그림 1과 같은 형식으로 주기적으로 전송되고, beacon과 beacon 사이의 공간이 노드들이 coordinator와 패킷을 주고받을 수 있는 시간이다. 이는 superframe 이라한다. Superframe의 길이는 BO (Beacon Order)라는 변수에 의해 결정되고 노드들이 경쟁적으로 패킷을 주고받는 CAP (Contention Access Period)의 길이는 SO (Superframe Order)라는 변수에 의해 조절된다.

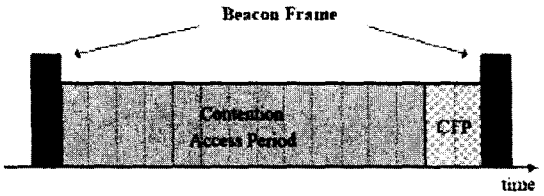

그림 1. IEEE 802.15.4 표준에서 정의한 Superframe의 구조.

Beacon-enabled 802.15.4 MAC에서 충돌기반의 방식에 노드는 전송을 시도하기 전에 임의의 시간을 대기한다. 이 임의의 대기 상태를 backoff라 하고, backoff 시간은 backoff exponent(BE)에 의해 결정이 된다. 임의로 대기 상태로 있을 시간은 $[0..2^{BE}-1]$의 범위에서 임의로 결정된다. 처음 초기화 과정에서 BE는 macMinBE로 설정이 된다. 하지만 CCA (Clear Channel Assesment) 과정에서 채널이 busy 상태로 판단되면, aMaxBE까지 값은 순차적으로 증가한다. 하지만 전송이 성공적으로 한번 이루어지거나 beacon에 의해서 BE의 값은 한 번에 다시 macMinBE로 재설정 된다. IEEE 802.15.4 MAC 표준에서는 macMinBE의 값을 0에서 3 사이의 값으로 명시하고 표준 값을 3으로 두고 있으며, aMaxBE는 표준 값을 5로 명시한다. 즉, 노드가 backoff exponent로 설정 할 수 있는 값은 3에서 5로 제한 되어 있으며, 실제 임의로 선택할 수 있는 대기 시간도 $[0..2^3-1]$에서 $[0..2^5-1]$로 제한 되어있다.

우리는 본 논문에서 macMinBE의 표준 값을 3이 아닌 더 작은 값으로 수정하고, aMaxBE를 15와 같은, 더 큰 값으로 설정할 것을 제안한다. 이럴 경우에 지나치게 큰 값이 backoff의 값으로 선택되면 하나의 superframe 이상을 쉬게 될 수도 있다. 이런 경우에 대한 대책은 IEEE 802.15.4 표준에 명시되어있다. 표준에 의하면 선택된 backoff의 값이 한 개의 superframe 보다 값이 커지면, 다음 beacon이 도착할 때 까지 backoff counter를 멈추고 다시 CAP가 시작 되는 곳부터 backoff를 이어가는 것으로 명시 되어있다. 이런 방식에 대한 설명은 그림 2에 나타난다. 그림 2에서 r은 현재 superframe에 남아있는 CAP slot 개수를 나타낸다.

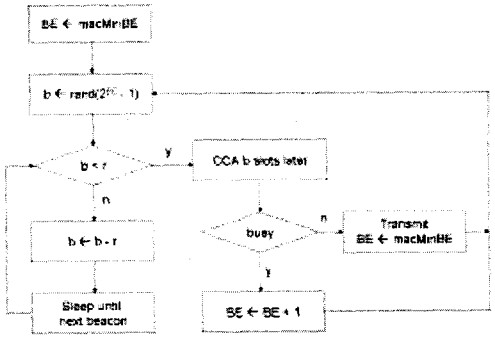

그림 2. Backoff 값이 superframe의 길이보다 큰 값이 설정 되었을 때 사용되는 알고리즘.

우리는 BE의 최소값을 더 작은 값으로 수정하고, 최대 값을 표준보다 더 큰 값으로 설정함으로서 backoff의 범위를 확장 시키고, 노드가 네트워크의 상황에 알맞게 대처 할 수 있게 하였다. 좁은 backoff를 지닌 노드는 채널 상황이 좋지 못함에도 불구하고 계속 전송을 시도하여 에너지 낭비 등의 손실을 가져오지만 상황이 좋지 않을 때는 더 긴 시간을 기다리고 좋을 때는 더 적은 대기 시간으로 빨리 전송이 이루어지도록 하는 효과를 가져올 것을 기대한다.

3. 실험 결과

실험은 한 개의 coordinator를 중심으로 여러 개의 노드가 둥글게 둘러 쌓여있는 모양을 지닌, 스타 토폴로지 (Star Topology) 형태의 네트워크를 기반으로 NS-2[10]를 통해 실험을 하였다. IEEE 802.15.4 MAC의 구현을 위해 [5]에서 개발된 802.15.4 MAC 시뮬레이터의 내용을 수정하여 사용하였다.

그림 3은 IEEE 802.15.4의 표준 MAC (return-on-success, BE=3:5)과 backoff 범위를 0에서 15까지 증가시킨 MAC (return-on-success, BE=0:15)를 비교한 것이다. Backoff 범위의 확장의 효과를 더 관찰하기 위해 표준에서 명시한대로 전송이 한번 성공할 경우 BE 값을 macMinBE로 재설정 하지 않고 [9]에서 제시한 것과 같이 단계적으로 BE값을 1씩 감소시키는 방식도 도입했다. 이 방식도 backoff의 범위를 표준대로 유지한 것과 범위를 0부터 15까지 증가시킨 두 가지 종류의 MAC으로 실험을 하였다. (decrease-on-success, BE=3:5, decrease-on-success, BE=0:15).

그림 3을 통해 IEEE 802.15.4 표준 MAC의 제한된 backoff 범위가 throughput 저하를 가져오는 요인임을 볼 수 있다. 단순히 BE의 범위를 확장함으로서 throughput은 최소한 40%가량 향상된다. 또한 노드의

개수가 늘어나면서, 즉, 충돌의 수가 많아지는 상황일수록 차이는 더욱 심해진다. 그림 3을 통해 또 한 가지 관찰할 수 있는 것은 [9]에서 제안된 알고리즘의 효율성이다. BE의 범위가 제한적인 경우에는 새로운 알고리즘의 도입을 통해 얻을 수 있는 성능향상 또한 상당히 적다. 반면 BE의 범위를 증가 시켜준 실험에서는 [9]와 같은 새로운 알고리즘의 도입이 훨씬 좋은 효과를 가져 옴을 알 수 있다.

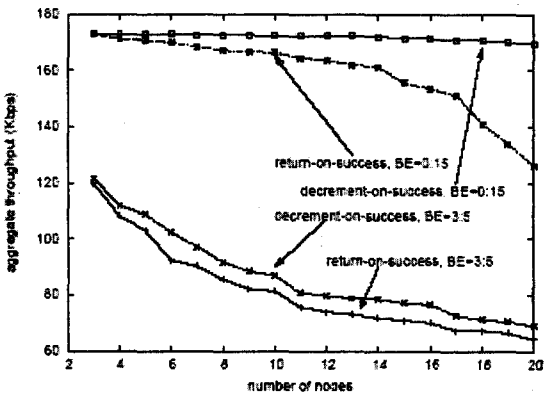

그림 3. Throughput

BE의 범위가 제한을 받으면서 성능이 저하되는 원인은 그림 4에서 볼 수 있듯이 충돌확률의 증가에 있다. 그림 4는 1개의 성공적인 패킷을 전송할 경우 발생하는 충돌의 개수를 나타낸 그래프이다. BE 범위가 제한된 그래프는 1번 전송에 1번 정도에 가까운 충돌을 보이는 반면, 범위가 증가 된 그래프 들은 그 보다 훨씬 적은양의 충돌만 일어난다. 이는 넓은 범위를 지정하였을 때는, 네트워크 상황에 더 잘 맞는 BE 값을 선택하여 불필요한 충돌을 피해 갈 수 있기 때문에 나타난 결과라 할 수 있다.

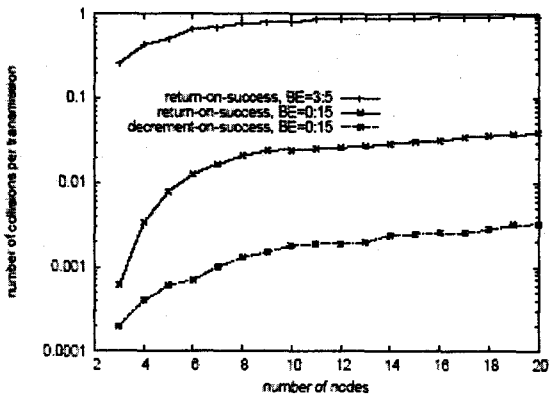

그림 4. 충돌 확률

그림 5는 아주 중요한 그래프이다. 그림 5는 각 상황에 대한 평균 BE 값을 측정한 그래프 인데, 여기서 오히려 좁은 범위의 BE값 보다 넓은 범위에서 더 낮은 평균 BE 값이 유지됨을 볼 수 있다. IEEE 802.15.4의 표준 MAC은 3에서 5사이의 범위를 지니고, 노드 수가 많아질수록 5 (최대값)에 가까운 수치를 보인다. 반면 0에서 15까지 범위를 넓힌 MAC은 0에서 1사이의 낮은 BE를 유지 함 을 관찰 할 수 있다. 이는 BE의 범위에 여유가 생기면서 충돌 확률이 감소하게 되어 오히려 적은 BE로도 네트워크의 부하를 감당 할 수 있음을 보여준다. 그림 5를 통해 backoff의 범위를 증가한다는 것이 큰 BE 값을 불러오는 원인이 되지 않는다는 것을 알 수 있다. 우리는 이를 통해 충돌이 많지 않은 네트워크 상황에서도 backoff의 범위를 확장하는 것이 아무런 악영향을 주지 않을 것이라고 예상할 수 있다.

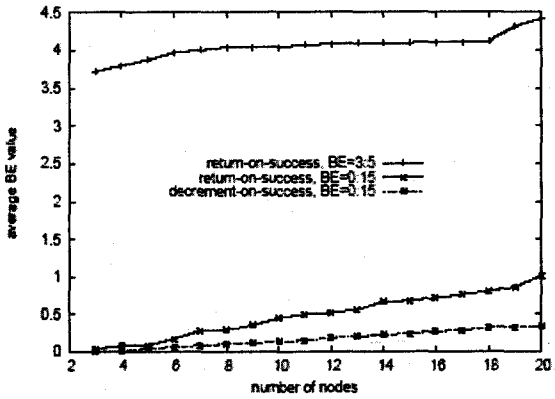

그림 5. 평균 BE 값

또 우리는 그림 5를 통해 BE의 범위가 넓다고 하여 네트워크의 지연이 길어진다는 일반적인 생각도 옳지 않음을 알 수 있다. 평균 BE 값은 네트워크의 지연과 관련되어있는데, 오히려 IEEE 802.15.4의 표준 MAC이 더 긴 지연을 소모한다는 것을 알 수 있다. 예를 들어 보면, n=20일 경우에 표준 MAC의 평균 BE 값은 4.5인 반면 backoff 범위 확장과 [9]의 알고리즘을 모두 도입한 MAC은 0.5의 수치를 유지한다. 그러므로 둘 사이의 지연은 $2^{4.5-0.5} = 16$ 배의 차이가 생긴다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 에너지 소모량을 ω/b로 나타낸 그래프이다. 우리는 널리 사용되는 TI Chipcon 2420 chipset [11]을 사용하여 전력 소모량을 측정하였다. 우리의 예측과 같이 IEEE 802.15.4 표준의 MAC은 수정된 두 가지의 방식의 MAC보다 더 많은 에너지를 소모하였다. 심지어 n=20인 경우에는 2배 정도의 에너지 소모량을 보였다. 두 배의 에너지를 소모했다 함은 정상적으로 두 노드가 작동하였을 때 수정된 MAC을 탑재한 노드는 표준의 MAC을 탑재한 노드에 비해 수명이 두 배가 증가한다는

뜻으로, 전력 낭비가 중요한 사안으로 여겨지는 센서 네트워크에서는 이 그래프는 시선을 주목할 만하다.

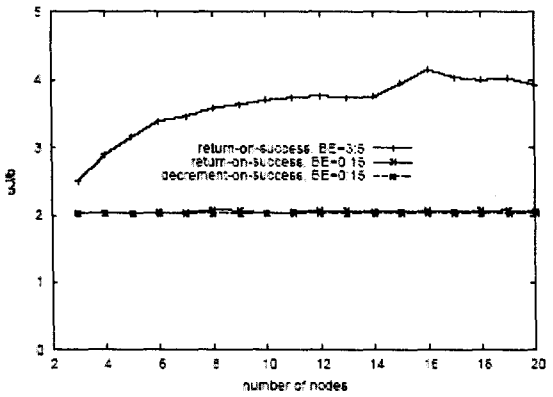

그림 6. 에너지 소모량

4. 결론

우리는 본 논문을 통해 IEEE 802.15.4에서 명시한 지나치게 좁은 backoff 범위가 IEEE 802.15.4 MAC을 사용하는 충돌이 잦은 네트워크의 성능을 저하 시킨다는 것을 보였다. aMaxBE를 더 큰 값으로 설정하고 macMinBE를 더 작은 값으로 설정하여 backoff exponent의 범위를 늘려 줌으로서 throughput, 지연, 에너지 소모 등의 성능을 급격히 향상 시킬 수 있었다. 이러한 수정은 충돌이 많지 않은 상황에서의 성능에는 전혀 지장을 주지 않고, 다른 추가적인 최적화 알고리즘을 도입하더라도 기존의 표준 MAC보다 효과적으로 반응함을 보인다.

5. Acknowledgements

본 논문은 산업자원부에서 시행한 성장동력기술개발사업(과제번호: 10016756)에 의해 지원되었음.

참조문헌

[1] IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control Layer (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), Oct. 2003

[2] G. Lu, B. Krishnamachari, C. S. Raghavendra, "Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-Rate Low-Power Wireless Networks," in proceedings of IEEE Workshop on Energy-Efficient Wireless Communications and Networks (EWCN), 2004.

[3] T. Park, T. Kim, J. Choi, S. Choi, and W. Kwon, "Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA-CA," IEE Electronics Letters, Vol. 41, issue 18, Sept 2005.

[4] J. Misic, V. B. Misic, S. Shafi, "Performance of IEEE 802.15.4 beacon enabled PAN with uplink transmissions in non-saturation mode - access delay for finite buffers," in proceedings of the First International Conference on Broadband Neworks, 2004.

[5] J. Zheng and M. Lee, "Will IEEE 802.15.4 Make Ubiquitous Networking a Reality?: A Discussion on a Potential Low Power, Low Bit Rate Standard," IEEE Communications Magazine, June 2004.

[6] B. Bougard, F. Catthoor, D. C. Daly, A. Chandrakasan, W. Dehaene, "Energy Efficiency of the IEEE 802.15.4 Standard in Dense Wireless Microsensor Networks: Modeling and Improvement Perspectives," in proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, 2005.

[7] J.-S. Lee, "An experiment on performance study of IEEE 802.15.4 wireless networks," in proceedings of IEEE international conference on emerging technologies and factory automation, 2005.

[8] P. Papadimitratos, A. Mishra, D. Rosenburgh, "A Cross-Layer Design Approach to Enhance 802.15.4 Military Communications Conference," in proceedings of IEEE MILCOM, 2005.

[9] A.-C. Pang, and H.-W. Tseng, ""Dynamic Backoff for Wireless Personal Networks,"" in proceedings of IEEE Globecom, 2004.

[10] The ns-2 simulator. Available at http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[11] Chipcon data sheet for 2.4GHz 802.15.4 ZigBee-ready RF transceiver. Available at http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_3.pdf.