

# IEEE 802.15.4 기반 센서 네트워크에서 LPL 구현

문성현<sup>0</sup>      김택주      차호정  
연세대학교 컴퓨터학과

shmoon<sup>0</sup>@cs.yonsei.ac.kr, taicki@gmail.com, hjcha@cs.yonsei.ac.kr

## Low Power Listening Implementation on IEEE 802.15.4-based

### Sensor Nodes

SungHyun Moon<sup>0</sup>      Taekjoo Kim      Hojung Cha  
Dept. of Computer Science, Yonsei University

#### 요 약

본 논문은 센서 네트워크에서 일반적으로 사용되고 있는 B-MAC의 저전력 기법인 LPL(low power listening)이 갖고 있는 하드웨어 의존성을 지적하고 이러한 의존성이 없는 LPL 구현 기법을 제안한다. preamble과 listening interval 간의 관계를 만족하기 위해 요구되는 기존 LPL의 조건들을 가상 프리엠블 패킷과 크로스 체크킹 방식을 이용하여 해결하였다. 본 논문이 제안하는 기법은 IEEE 802.15.4 기반의 CC2420 RF칩에서의 실험을 통하여 기존의 LPL과 유사한 성능을 보여주었으며, idle listening을 최소화하여 RF칩의 duty cycle이 최대 10.6%까지 감소하였다.

#### 1. 서 론

무선 센서 네트워크에서 각 센서 노드들은 환경적인 변화를 센싱하여 적절한 데이터를 RF를 통하여 신뢰성 있게 다른 노드에게 전송한다. 여기서 센서 노드가 지원하는 에너지의 상당 부분은 데이터 전송을 담당하는 RF 부분에서 나타난다. 따라서 RF 사용량을 줄이는 것이 센서 노드의 효과적인 저전력 방법이다. 실제로 많은 센서 노드들은 데이터를 주고받는 시간보다 주변 환경을 센싱만 하고 RF를 사용하지 않는 시간이 월등히 높다. 이렇게 RF를 사용하지 않으면서 데이터 수신을 위해 RF 전원을 켜놓고 있는 상태를 idle state라고 한다. idle state에 있는 시간을 줄이고 데이터 전송 또는 수신이 필요할 때에만 RF를 켜는 것은 센서노드의 수명을 상당히 늘릴 수 있다.

이러한 방식은 MAC 프로토콜을 중심으로 많은 연구가 진행되어왔다. 그 중 scheduling 기반으로 제안된 FPS[1][2]가 있다. FPS는 시간 동기화된 네트워크에서 트래픽 양에 따라 필요한 크기의 슬롯을 할당받는 비경쟁 기반의 저전력 기법이다. [7]은 현재 센서네트워크에서 가장 일반적으로 사용되는 MAC 프로토콜로, 기존의 경쟁 기반 MAC 프로토콜에서 제안되었던 preamble sampling 메카니즘[6]을 이용하여 Low Power Listening 기법을 제안하였다. [6]에서 제안된 preamble sampling 메카니즘은 idle state에 머무는 동안 RF를 꺼놓으면서 수신 데이터를 놓치지 않고 소비 전력을 감소시키는 기법으로 [7]에서 이 메카니즘에 의한 저전력 성능에 대해

자세히 기술되었다.

LPL의 preamble sampling 기법은 listening interval보다 preamble 길이를 더 길게 하여, 송신자가 어떤 시점에 데이터를 보내든 상관없이 안정적으로 데이터 패킷을 받을 수 있도록 한다. 이러한 원리는 하드웨어적 특성에 의존적이다. 예를 들어 CC1000 RF 칩은 충분한 길이의 preamble 길이를 하드웨어적으로 제공해주기 때문에 LPL 기능이 구현 가능하다. 반면, CC2420 RF 칩과 같이 최근 센서네트워크에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 IEEE 802.15.4 기반 RF 칩에서는 이러한 하드웨어적인 조건을 필수적으로 지원해주고 있지 않다. 따라서 LPL을 구동시켜서 얻을 수 있는 에너지 절약의 기회를 놓치고 있다.

본 논문에서는 가상 프리엠블 크로스-체크킹 기법을 사용한 LPL을 제안한다. 이 기법은 기존 LPL이 구현될 수 없는 하드웨어적인 조건 하에서도 LPL을 구동시킬 수 있다. 기존 LPL은 하드웨어가 preamble 길이를 충분히 지원하지 못 하거나, RF 칩의 대역폭이 증가하여 preamble 길이가 확보되지 못 하면 구현이 불가능하였다. 우리가 제안하는 기법은 이 두 가지 상황의 어떠한 경우라도 LPL이 정확하게 동작할 수 있도록 한다. 제안하는 기법은 preamble sampling 기법과 유사한 채널 검사 방식을 송신자와 수신자가 양방향으로 사용하여 이러한 목표를 달성하였다.

#### 2. IEEE 802.15.4 기반 RF 칩에서의 LPL 구현

이 절에서는 기존 LPL의 기본 원리와 하드웨어 의존성에 대해 알아보고, 이를 바탕으로 가상 프리엠블 크로스-체크킹 기법을 제안한다.

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 국가지정 연구실 사업으로 수행하였음 (과제번호 : 2006-01546)

2.1 LPL(Low Power Listening)

B-MAC의 LPL에서 핵심이 되는 preamble sampling 기법은 데이터를 신뢰성 있게 받기 위해서 preamble의 길이를 listening interval보다 길게 전송하는 것이다. 이러한 단순한 LPL의 원리는 하드웨어 종속적이다. CC1000 RF칩의 경우, preamble 길이를 소프트웨어적으로 조정할 수 있도록 하드웨어가 지원하고 있다. 따라서 센서 네트워크에서 일반적으로 사용되고 있는 tinyOS 운영체제의 MAC에서는 7개 모드의 listening interval과 그보다 충분히 긴 시간 동안 채널을 점유할 수 있는 preamble 길이를 지원하고 있다.

하지만 최근 센서 네트워크 분야에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 CC2420 RF칩은 현재 LPL을 구동시키는 것이 불가능하다. IEEE 802.15.4 기반의 CC2420 RF칩은 특정 레지스터 값을 변경하여 preamble의 길이를 1비트에서 8비트까지 조정할 수 있다. 하지만 대역폭이 250kbps에 달하기 때문에 아래 식과 같이 preamble이 channel을 점유할 수 있는 최대 시간은 0.512ms 정도 밖에 되지 않는다. 실효 대역폭이 250kbps의 1/10이라 해도, 최대 점유 시간은 5.12ms이다.

$$\frac{16 \times 8(\text{bit})}{250000(\text{bit/sec})} = 0.512(\text{ms}) \quad (1)$$

만약 CC2420 RF칩에 LPL을 구동시키려면 listening interval이 0.512ms를 넘어서는 안 된다. 하지만 이 정도 listening interval 값은 저전력 프로토콜에서는 의미가 없다. 0.512ms마다 한 번씩 채널 체크를 한다면 오히려 RF를 키고 끄는 오버헤드로 인해 전력 사용이 더 증가할 것이다. 그래서 현재 CC2420 RF칩에서는 LPL이 구현되어 있지 않고 idle state에서도 항상 RF를 켜놓는다.

본 논문은 이러한 하드웨어 제약이 존재하는 CC2420 RF칩을 한 예로 하여, preamble 길이를 충분히 지원하지 못하는 IEEE 802.15.4 기반의 RF칩에 LPL을 구현할 수 있는 기법을 제안한다.

2.2 가상 프리엠블 크로스-체크 기법

B-MAC의 기존 LPL이 지원하는 listening interval 값은 20ms에서 최대 1035ms까지 7개의 모드이다. CC2420 RF칩이 이 7개 모드 중 하나인 185ms의 listening interval 값을 갖기 위해서는 아래 식에 의해서 preamble 길이가 최소 5782byte가 되어야 한다.

$$250000(\text{bit/sec}) \times 0.185(\text{sec}) = 46250(\text{bit}) = 5781.25(\text{byte}) \quad (2)$$

CC2420 RF칩이 지원하는 preamble 길이는 최대 16byte이다. LPL 구현에 필요한 나머지 수천 byte의 preamble을 만들기 위해서 우리는 가상 프리엠블 개념을 제안한다. 가상 프리엠블은 IEEE 802.15.4에서 제안한 패킷 포맷을 그대로 갖춘 패킷을 마치 프리엠블과 같이 사용하는 것이다. IEEE 802.15.4에서 제안하는 패킷은 MAC 헤더를 포함하여 payload를 모두 채웠을 때 39byte이다. 따라서 데이터를 전송하기 전에 이러한 가상 프리엠블 패킷을 여러 번 보내고, 그 후 실제 데이터 패킷을 보내는 것이다. 물론 가상 프리엠블 패킷을 보내는 횟수는 listening interval보다 긴 시간 동안 채널을 점유할 수 있도록 한다.

이렇게 다수의 프리엠블 패킷을 전송할 때 고려해야 할 점은, 패킷이 네트워크 각 계층을 거치고 RF칩의 하드웨어적인 처리 과정에 의해서 수 ms 정도의 지연 시간이 발생한다는 것이다. FTSP[8]는 시간 동기화를 위해서 이러한 지연시간에 대한 연구를 진행했었다. 우리는 IEEE 802.15.4 기반 CC2420 RF칩을 한 예로 이러한 지연시간을 오실로스코프로 측정하였다. 그 결과 39byte 길이의 패킷을 연속적으로 전송할 경우 최소 12ms 이상의 시간 간격이 필요하였다. 또한 패킷이 채널을 점유는 최대 시간은 아래 식과 같이 구할 수 있다. 이 값 역시 오실로스코프로 측정하게 되면 실효 대역폭이 250kbps에 미치지 못하므로 약 2ms의 채널 점유 시간이 구해진다. 본 논문에서는 이 두 가지 값 - 가상 프리엠블 패킷의 전송 시간 간격과 채널 점유 시간 - 모두 실험 측정치를 기반으로 한다.

$$\frac{39 \times 8(\text{bit})}{250000(\text{bit/sec})} = 1.248(\text{ms}) \quad (3)$$

가상 프리엠블 개념에 기초로 프리엠블을 보낼 경우 가상 프리엠블 패킷 사이에는 약 10ms 정도의 시간 간격이 발생하고 패킷 하나는 2ms 정도의 시간만이 채널을 점유하게 된다. 이러한 방식은 다수의 센서 노드가 통신할 경우 가상 프리엠블 패킷 간에 인터리빙 현상을 유도하여 결국 데이터 패킷이 충돌할 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 우리는 가상 프리엠블 크로스-체크 기법(Virtual Preamble Cross-Checking, VPCC)을 제안한다.

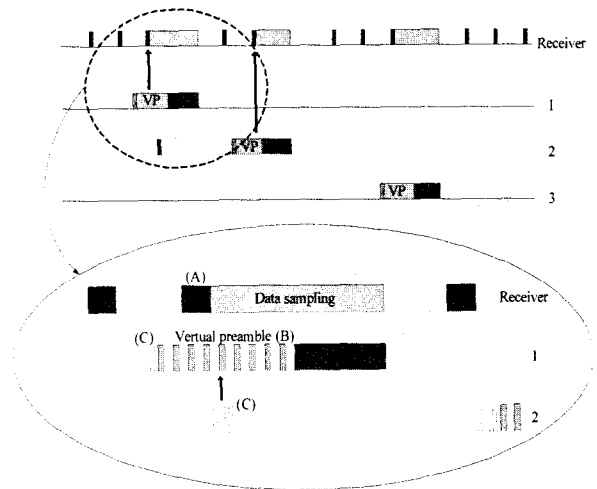


그림 1 VPCC 작동 원리

그림 1은 VPCC가 동작하는 모습을 보여준다. 기본적인 동작은 기존의 LPL과 같다. 모든 노드는 listening interval을 주기로 일정시간 동안 채널 체크를 위해 active state에 머문다.(A) 전송자는 데이터 패킷을 보내기 전에 listening interval 보다 긴 시간 동안 가상 프리엠블 패킷을 보내고(B), 수신자는 listening interval 주기로 깨어났을 때 이 가상 프

리앰블 패킷을 받게 된다. 프리앰블 패킷을 받은 후 수신자는 데이터 패킷을 모두 받을 때까지 active state에 머문 뒤, sleep state로 들어간다.

(B)는 앞서 언급했듯이 12ms 간격으로 분절되어 전송되는 가상 프리앰블 패킷을 나타낸 것이다. 이러한 가상 프리앰블 패킷을 수신자가 놓치지 않기 위해서, 수신자가 가상 프리앰블 패킷이 전송되는 시간 간격(12ms)보다 더 긴 시간 동안 (>12ms) 깨어있도록 한다. 깨어 있는 시간 동안 가상 프리앰블 패킷을 받을 경우 수신자는 데이터 패킷을 모두 받을 때까지 계속 active state에 머물고 그렇지 않은 경우는 다시 sleep state로 돌아간다.

그림 1에서 1번 노드가 가상 프리앰블 패킷을 전송 중일 때 2번 노드가 패킷을 전송하고자 한다면, 가상 프리앰블 패킷이 서로 번갈아 가며 전송될 수 있다. 즉, 1번 노드가 전송하는 가상 프리앰블 패킷들의 분절된 사이 시점에서 2번 노드가 채널을 체크하고 바로 패킷을 전송할 경우, 결국 패킷 충돌이 발생하게 된다. 따라서 기존의 채널 체크 방법이 아닌 새로운 채널 체크 방법이 필요하다.

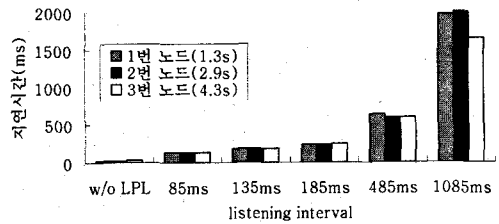
그림 1에서 (C)는 채널 체크를 일정한 주기로 일정 횟수를 반복하는 모습을 나타낸 것이다. 채널 체크 주기는 가상 프리앰블 패킷이 채널을 점유하는 시간(2ms)보다 짧게 하고 (<2ms), 가상 프리앰블 패킷의 시간 간격(12ms)보다 긴 시간 동안(>12ms) 채널 체크를 반복한다. 그리고 이 시간 동안(>12ms) 채널이 계속 비어있다면, 패킷 전송을 시도하고 한 번이라도 채널이 점유 상태였다면 백오프 과정을 진행한다. 예를 들어 CC2420 RF칩의 경우 채널 체크를 1ms 간격으로 15번 실행한다면, 가상 프리앰블 패킷의 점유 시간(2ms)보다 짧은 시간 간격(1ms)으로 채널을 체크하고, 가상 프리앰블 패킷의 전송 시간 간격(12ms)보다 긴 시간 동안(15ms) 채널을 체크하게 된다.

이러한 VPCC는 가상 프리앰블 패킷을 놓치지 않기 위해서 기존의 LPL보다 더 오랜 시간 동안 RF를 켜놓아야 하지만, 가상 프리앰블을 보내기 위해 RF를 사용하는 시간이 감소된다. CC2420 RF칩의 경우 가상 프리앰블 패킷이 12ms 시간 간격을 두고 2ms 동안만 RF를 사용하므로 최소 2/12까지 RF에 의한 전력사용량이 감소된다. 따라서 데이터 전송양이 많은 네트워크에서는 기존의 LPL보다 전력 감소 효과가 높다.

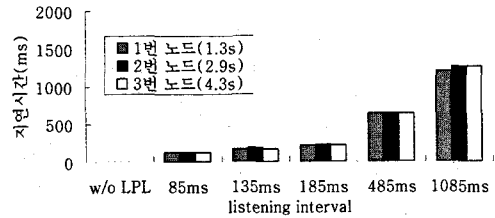
### 3. 실험

제시한 기법의 성능 평가를 위해 CC1000 RF칩을 탑재한 Mica2 모트[9]와 IEEE 802.15.4 기반의 CC2420 RF칩[10]을 탑재한 telosb 센서 모트[11]를 실험에 사용하였다. VPCC는 TinyOS 기반의 MAC을 수정하여 구현하였다.

그림 2와 그림 3은 3개의 노드가 각각 1.3초, 2.9초, 4.3초를 주기로 하나의 노드에 패킷을 전송하였을 때 listening interval의 변화에 따른 지연 시간과 패킷 수신 성공률을 보여주고 있다. 패킷은 모두 100개가 전송되었고 지연 시간은 각 노드가 패킷을 전송하고 다시 수신응답패킷을 받았을 때까지의 시간으로 정의하였다. 이 실험은 본 논문이 제안하는 VPCC가 CC1000에서의 LPL과 유사한 기능을 보이는데에 대한 평가가 된다.

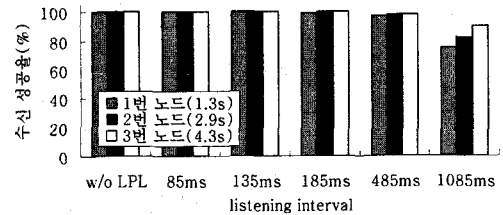


(a) CC1000

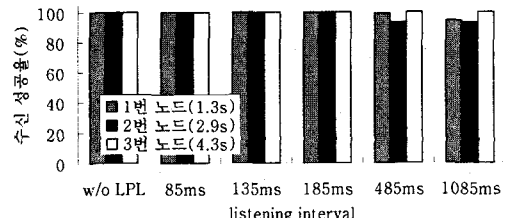


(b) CC2420

그림 2 listening interval 변화에 따른 지연시간



(a) CC1000



(b) CC2420

그림 3 listening interval 변화에 따른 패킷 수신 성공률

그림 2에서 지연시간은 LPL을 사용하지 않았을 때 CC1000에서 30ms 이내, CC2420에서 5ms 이내의 값이 측정되었고, LPL에 의한 지연시간은 listening interval에 비해 10~50% 정도 더 큰 값이 측정되었다. CC2420에서 listening interval이 85ms일 때는 50% 증가된 약 125ms, 1085ms일 때는 10% 정도 증가된 약 1220ms가 구해졌다. 이것은 프리앰블을 보내는 시간을 고려하면 충분히 예측 가능한 값이다. CC1000에서 LPL에 의한 지연시간은 listening interval이 1085ms일 때를 제외하고 CC2420과 비슷하거나 최대 15%까

지 증가하였다. 1085ms의 경우 지연시간이 최대 59% 작게 측정되었는데 이것은 채널을 확보하지 못한 상태에서 백오프 과정을 거치는 전송 재시도 횟수에 차이가 있기 때문이다. 재시도 횟수가 클 경우 그만큼 전송 지연이 발생하게 된다. 반대로 재시도 횟수가 작을수록 지연시간은 감소하지만, 그만큼 전송 실패되는 패킷이 많아지므로 수신 성공률은 감소한다.

그림 3에서 listening interval이 485ms와 1085ms일 때 CC1000과 CC2420 모두 수신 성공률이 100%가 되지 못하는 이유는 노드들이 모두 1~4초 정도의 비교적 짧은 주기를 갖고 패킷을 전송하고 있기 때문이다. listening interval이 증가하면 라디오를 끄고 있는 시간이 길어지기 때문에 그 사이에 재시도 횟수를 초과하여 전송 실패되는 패킷이 증가하게 된다. 그리고 앞서 언급했듯이 listening interval이 1085ms일 때 전송 재시도 횟수의 차이로 인해 CC2420의 수신 성공률이 CC1000에 비해 감소된 것을 볼 수 있다.

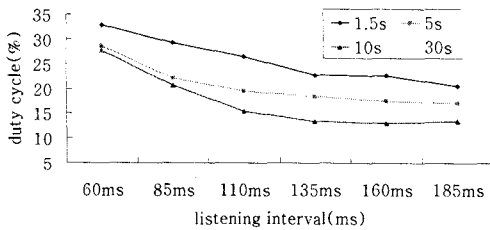


그림 4 listening interval과 패킷 전송 주기 변화에 따른 duty cycle 변화

그림 4는 VPCC의 listening interval 변화와 패킷 전송 주기에 따른 CC2420의 duty cycle 값을 측정하는 것이다. 3개의 노드가 모두 1.5초, 5초, 10초, 30초의 주기로 패킷을 전송하였고 listening interval은 패킷 수신 성공률이 100%를 유지할 수 있는 범위로 60ms부터 185ms까지 25ms 단위로 증가시켰다. duty cycle은 패킷을 전송하는 동안 RF칩이 전원을 얼마 동안 켜놓는지를 시간 비율로 표현한 값으로 VPCC의 저전력 효과를 예측할 수 있다.

그림 4를 보면 listening interval이 증가할수록 라디오를 켜놓는 시간이 증가하므로 duty cycle은 감소하였다. 하지만 그 비율이 감소하므로 duty cycle의 기울기가 완만해지는 것을 볼 수 있다. 패킷 전송 주기를 변화시켰을 경우, listening interval이 60ms일 때는 32.9%에서 27.2%까지 감소하였는데, 185ms일 때는 20.6%에서 10.6%까지 더 큰 감소량을 보였다. 따라서 네트워크 트래픽이 클수록 listening interval을 길게 하는 것이 에너지 소모를 더 줄일 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문이 제시하는 저전력 기법은 경쟁 기반의 MAC 프로토콜에서 기존의 LPL 기법이 갖는 하드웨어 의존성을 없애고 idle listening 동안 RF를 꺼놓을 수 있도록 가상 프리앰블 개념을 이용하였다. 가상 프리앰블 패킷은 크로스 체크링 방식으로 하나의 연속된 프리앰블을 사용하는 것과 유사한 성능을 보여주었다. 이 기법은 네트워크 트래픽에 따라 요구

되는 지연 시간을 만족하는 listening interval을 설정함으로써 duty cycle을 최대 10.6%까지 절감할 수 있다.

향후 연구로는 이웃 노드들의 개수와 hop 수 등을 변화시키면서 다양한 토폴로지에서의 VPCC 성능에 대해 평가할 예정이다. 이와 같이 토폴로지 관점에서 바라볼 경우, 지연 시간 뿐만 아니라 혼잡에 관한 데이터 전송의 신뢰성도 고려해야 한다. listening interval이 길어질수록 혼잡을 더 쉽게 발생시킬 수 있으므로 센서 MAC 관점에서 저전력 기법과 혼잡 제어를 함께 연동하는 연구도 이뤄질 것이다.

#### 참고문헌

- [1]Barbara Hohlt, Lance Doherty, Eric Brewer. "Flexible Power Scheduling for Sensor Networks." In Proc. Information Processing in Sensor Networks(IPSIN) 2004.
- [2]Barbara Hohlt and Eric Brewer. "Twinkle: Network Power Scheduling in Sensor Networks." In Proc. Technical Report No. UCB/CSD-05-1409, 2005.
- [3]Diba Mirza, Maryam Owrang, Curt Schurgers. "Energy-efficient Wakeup Scheduling for Maximizing Lifetime of IEEE 802.15.4 Networks." In Proc. the International Conference on Wireless Internet(WICON) 2005.
- [4]Matthew J. Miller, Nitin H. Vaidya. "A MAC Protocol to Reduce Sensor Network Energy Consumption Using a Wakeup Radio." IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 4, no. 3, pp. 228-242, May/June, 2005.
- [5]Ramanan Subramanian, Faramarz Fekri. "Sleep Scheduling and Lifetime Maximization in Sensor Networks: Fundamental Limits and Optimal Solutions." In Proc. Information Processing in Sensor Networks(IPSIN) 2006.
- [6]A. El-Hoiydi. "Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks." In Proc. IEEE International Conference on Communications 2002.
- [7]Joseph Polastre, Jason Hill, David Culler. "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks." In Proc. ACM Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys) 2004.
- [8]Miklos Maroti, Branislav Kusy, Gyula Simon, Akos Ledeczi. "The Flooding Time Synchronization Protocol." In Proc. ACM Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys) 2004.
- [9]CC1000 Data sheet. [http://www.chipcon.com/files/CC1000\\_Data\\_Sheet\\_1\\_2.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC1000_Data_Sheet_1_2.pdf).
- [10]CC2420 Data sheet. [http://www.chipcon.com/files/CC2420\\_Data\\_Sheet\\_1\\_2.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_2.pdf).
- [11]telosb moteiv Data sheet. <http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>.