

무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 비동기 방식의 센서 MAC 프로토콜 설계

An Energy-Efficient Asynchronous Sensor MAC Protocol Design for Wireless Sensor Networks

박인혜*, 이형근**, 강석중***

Inhye Park*, Hyungkeun Lee**, Seok-Joong Kang***

Abstract

Synchronization MAC Protocol such as S-MAC and T-MAC utilize duty cycling technique which periodically operate wake-up and sleep state for reducing energy consumption. But synchronization MAC showed low energy efficiency because of additional control packets. For better energy consumption, Asynchronization MAC protocols are suggested. For example, B-MAC, and X-MAC protocol adopt Low Power Listening (LPL) technique with CSMA algorithm. All nodes in these protocols joining a network with independent duty cycle schedules without additional synchronization control packets. For this reason, asynchronous MAC protocol improve energy efficiency. In this study, a low-power MAC protocol which is based on X-MAC protocol for wireless sensor network is proposed for better energy efficiency. For this protocol, we suggest preamble numbering, and virtual-synchronization technique between sender and receive node. Using TelosB mote for evaluate energy efficiency.

요 약

초기의 동기식 프로토콜의 대표적인 S-MAC 과 T-MAC은 듀티사이클 기법을 사용으로 주기적인 활성화와 비활성을 반복함으로써 기존의 무선 MAC 프로토콜에 비하여 에너지 소모를 줄였음을 보였다. 하지만 동기식 프로토콜은 동기화를 위한 별도의 제어패킷이 사용됨으로써 에너지 효율성이 떨어지고 설계 면에서도 복잡하다는 단점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 비동기 프로토콜인 B-MAC과 X-MAC은 CSMA매체 접근 방식과 프리앰블을 통한 전송을 하는 LPL(Low Power Listening)기법을 사용하여 별도의 제어패킷의 사용 없이 독립적인 듀티사이클 스케줄을 가지고도 통신이 가능하도록 설계됐다. 본 논문에서는 이러한 비동기 프로토콜인 X-MAC을 기반으로 보다 높은 에너지 효율성을 갖는 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 비동기 방식의 센서 MAC 프로토콜을 설계한다. 이를 위하여서 송신노드와 수신노드에 프리앰블 넘버링 기법과 가상동기화기법을 설계 및 적용하였으며 대표적인 센서 노드인 TelosB센서모드를 이용하여 기존의 X-MAC 프로토콜과 에너지 효율성을 비교 및 검증한다.

Key words : X-MAC, 비동기 센서 MAC 가상 동기화, LPL, 프리앰블 넘버링

* 광운대학교 전자정보공과대학 컴퓨터공학과 박사과정

** 광운대학교 전자정보공과대학 컴퓨터공학과 부교수

*** 광운대학교 전자정보공과대학 컴퓨터공학과 부교수

※ 본 연구는 지식경제부 및 IDEC 플랫폼 센터의 지원으로 수행하였음.

接受日:2012年 03月 07日, 修正完了日: 2012年 06月 05日

掲載確定日: 2012年 06月 13日

1. 서론

IEEE 802.15.4 LR-WPAN의 특성을 이용한 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks)는 기본적으로 센서노드들이 배터리로 동작하기 때문에 전원의 교환이나 충전이 어렵다. 따라서 각 센서 노드들은

배터리의 수명이 다할 때까지 데이터를 전송 할 수 있어야 하며 단-대-단(end-to-end)전송 시의 데이터를 전달하는데 소모되는 에너지를 줄이는 것이 센서 네트워크 설계에 가장 고려해야할 점이다. 또한 센서 네트워크의 특성상 센서 노드에서 수집된 정보를 제한된 시간 안에 정보 수집기(data collector) 즉 Sink 노드에게 전달해야하므로 최대 단-대-단 지연(maximum end-to-end delay) 조건을 배터리 수명을 고려하여 최소화해야 한다. 따라서 에너지 효율성을 높이는 것이 가장 중요한 이슈이다.[1] 센서네트워크에서 주요 에너지 소모요인으로는 패킷 충돌(Packet Collision), 오버히어링(Overhearing), 컨트롤 패킷 오버헤드(Control Packet Overhead), 아이들 리스닝(Idle Listening)을 들 수 있으며[2] 이 중에서 아이들 리스닝은 노드가 전송되는 데이터가 없는 상태에서도 계속해서 라디오를 온 상태로 기다리기 때문에 에너지 소모에 가장 큰 영향을 미친다.[3] 아이들 리스닝을 해결하기 위하여 많은 프로토콜들이 듀티사이클링(duty cycling) 기법을 채용하였다. 초기에는 S-MAC, T-MAC과 같은 동기(Synchronous) 방식의 MAC 프로토콜이 제안되었다. 이러한 동기식 프로토콜은 스케줄을 맞추기 위한 추가적인 컨트롤 패킷 오버헤드가 발생하기 때문에 이로 인한 에너지 효율성이 떨어지고 설계 면에서도 구현이 복잡하다.

에너지 효율성이 좋은 X-MAC 프로토콜은 비동기 방식의 MAC 프로토콜이 노드 각각의 듀티사이클을 가지고 동작한다는 한계성 때문에 이에 따른 프리엠블 전송 횟수 증가에 따른 에너지 효율성 감소가 일어난다. 따라서 본 논문에서는 기존의 X-MAC 프로토콜의 에너지 효율성을 더욱 개선하기 위하여 가상 동기화(Virtual Synchronization) 기법을 추가하여 프리엠블의 전송 횟수를 줄여 무선 센서 네트워크의 에너지 효율성을 높이는 MAC 프로토콜을 설계하였고, 해당 프로토콜을 TinyOS 기반 TelosB mote에 구현하여 기존의 X-MAC 프로토콜에 비해 에너지 효율성이 증가되었음을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 관련 연구를 소개하고 3장에서는 에너지 효율성 증가를 위한 가상동기화 기법에 대하여 소개하고, X-MAC 프로토콜에 추가하여 저전력 센서 MAC 프로토콜을 설계한다. 4장에서는 X-MAC 프로토콜과 제안하는 X-MAC 프로토콜의 성능을 비교한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결과를 간단히 정리하고 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

1. 동기 방식의 센서 MAC 프로토콜

가. S-MAC

S-MAC[4] 프로토콜은 슬롯(slotted) 개념을 사용하는 MAC 프로토콜로 듀티사이클을 적용하여 노드가 주기적으로 활성구간(active part)과 수면구간(sleep part)으로 전환이 가능하도록 했다. 수면구간에서는 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄으로써 에너지 소모를 최소화 줄일 수 있다. S-MAC 프로토콜은 IEEE 802.15.4 MAC에 비해 주기적인 슬립(sleep)과 리스닝(listen)을 반복함으로써 데이터 로드가 적을 때 설정된 듀티사이클만큼 에너지 소모를 줄일 수 있다. IEEE 802.15.4 MAC도 비활성 구간으로 슬립 효과를 가능하게 할 수 있지만 이것은 비콘 가능 모드에 따른 효과이며, 오버히어링과 같은 문제는 해결하지 못한다.

나. T-MAC

T-MAC[5]에서 동작하는 모든 노드들은 S-MAC과 마찬가지로 이웃 노드와의통신을 위하여 주기적으로 활성화되어 데이터를 전송하며 데이터가 없을 시에는 다음 활성화까지 슬립 상태로 전환된다. 각 노드들은 통신을 위해 CSMA/CA 메커니즘 기반의 RTS, CTS, DATA, ACK를 사용하여 충돌을 회피하고, 데이터 전송에 있어서 신뢰성을 보장한다. 이러한 방식은 활성 시간동안 데이터를 한꺼번에 전송하고, 송수신 데이터가 없다면 일정한 시간의 타이머(TA)를 동작시켜 S-MAC보다 일찍 슬립 상태로 전환함으로써 불필요한 아이들 리스닝 에너지를 줄일 수 있다.

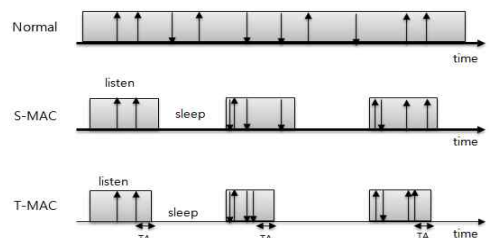


Fig 1. A comparison of S-MAC and T-MAC

그림 1. S-MAC과 T-MAC의 동작 비교

그림 1은 S-MAC과 T-MAC의 동작 비교를 나타낸다. S-MAC은 듀티사이클이 고정되어 있기 때문에 정해진 활성 시간동안 리스닝 상태를 유지해야하기 때문에 전송이 일어나지 않을 시에는 아이들 리스닝으로 인한 에너지 낭비가 일어난다. 반면에 T-MAC은 정해진 타이머(TA) 동안 전송이 일어나지 않으면

바로 슬립 상태로 전환하여 불필요한 아이들 리스닝을 최소화 했다. 따라서 S-MAC 프로토콜보다 에너지 효율성을 향상 시켰음을 알 수 있다.

2. 비동기 방식의 센서 MAC 프로토콜

가. B-MAC

B-MAC(Berkeley-MAC)[6]은 비동기 방식으로 동작하는 대표적인 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜로서 CSMA 메커니즘을 사용하여 채널접근 사용되는 제어 패킷 오버헤드를 제거하였다. B-MAC으로 동작하는 노드들은 각각의 듀티사이클 스케줄에 따라 활성화된 후, 매체에 유효한 신호가 있는지 여부를 확인하는 LPL(Low Power Listening)을 수행한다.

B-MAC은 그림 2와 같이 동작한다. 송신노드는 전송할 데이터가 있을시 체크 인터벌보다 긴 프리앰블을(long preamble) 데이터 전송에 앞서 전송하여 인근 노드에게 데이터 전송을 알린다. 수신노드는 긴 프리앰블을 수신한 후에 프리앰블에 뒤따르는 패킷헤더, 즉 현재 전송되는 데이터의 수신노드 주소 등을 확인한 후에 자신에게 오는 데이터 이면 계속해서 데이터를 전송 받고 자신에게 오는 데이터가 아니면 다시 비활성화 된다. 이러한 B-MAC 프로토콜은 노드들 간에 동기를 위한 절차가 없어 간단하고 컨트롤 패킷 오버헤드를 없앴으로써 기존의 동기방식의 프로토콜보다 에너지 효율성을 향상시켰다. 하지만 데이터 전송을 위하여 체크 인터벌보다 긴 프리앰블을 사용해야 함으로써 수신노드가 아닌 노드들 또한 이 프리앰블을 데이터 헤더까지 모두 들어야 하는 단점이 있다.

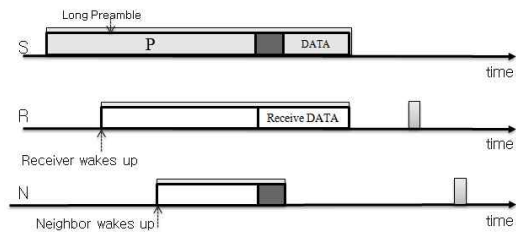


Fig 2. B-MAC protocol
그림 2. B-MAC 프로토콜의 동작과정

나. X-MAC

X-MAC[7] 프로토콜은 B-MAC에서 사용된 긴 프리앰블로 인한 프리앰블 오버헤어링과 데이터 오버헤어링의 문제점을 해결하기 위하여 수신노드의 주소를 삽입한 짧은 프리앰블(short preamble)을 사용한다. 또한 짧은 프리앰블 사이마다 얼리 애크(Early-ACK)

를 수신 할 수 있는 기간을 뚫으로써 짧은 프리앰블을 수신 한 수신노드가 목적지 주소를 확인 후 자신에게 전송된 프리앰블이던 얼리 애크를 통하여 수신노드에게 알림으로써 전송이 바로 시작될 수 있도록 하고 있다. 즉, X-MAC으로 동작하는 노드들은 자신이 전송할 데이터가 있는 경우 그림 3과 같이 이웃노드들에게 전송할 데이터가 있음을 알리는 목적지 주소가 내장된 짧은 프리앰블을 전송한 뒤, 얼리애크(Early ACK)를 수신할 수 있는 충분한 기간 동안 수신 대기 상태를 유지한다. 송신 노드의 이웃 노드들은 짧은 프리앰블에 포함된 목적지 주소로 자신이 수신 대상인지를 판단한다. 자신이 수신 대상이면 얼리 애크를 전송하여 송신 노드에게 자신이 짧은 프리앰블을 수신하였고, 데이터를 수신할 준비가 되었음을 알린다. 자신이 수신 대상이 아니라면 슬립 상태로 전환하여 이후에 전송되는 짧은 프리앰블이나 데이터를 수신하지 않는다. 따라서 X-MAC 프로토콜을 사용하는 송신 노드들은 B-MAC에서와 같이 긴 프리앰블을 전송하지 않고, 얼리애크가 수신될 때까지 짧은 프리앰블을 나누어 전송함으로써 에너지 효율성을 향상시켰으며, 수신 노드들도 긴 프리앰블을 수신하지 않고 짧은 프리앰블 하나만 수신하게 함으로써 통신에 관여하는 노드 모드에게 있어서 불필요한 에너지 낭비를 제거하였다. 그림 3은 B-MAC과 X-MAC의 동작 과정에 따른 시간과 에너지 소모를 비교한 것으로서 긴 프리앰블을 사용하는 B-MAC 프로토콜에 비하여서 짧은 프리앰블과 얼리애크를 사용하는 X-MAC 프로토콜이 보다 낮은 에너지 소비와 데이터 전송에 걸리는 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

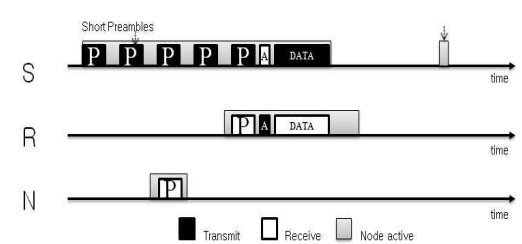


Fig 3. X-MAC protocol
그림 3. X-MAC 프로토콜의 동작 과정

III. 에너지 효율적인 MAC 프로토콜 설계 및 구현

1. 에너지 효율적인 MAC 프로토콜 설계

2장에서 설명한 것과 같이 X-MAC 프로토콜은 긴 프리엠블을 사용하는 B-MAC에 비하여 짧은 프리엠블과 열리 액세스의 이용으로 프리엠블 오버헤딩과 데이터 오버헤딩을 줄임으로써 에너지 효율성을 향상시켰다. 하지만 X-MAC 프로토콜을 사용하는 노드는 각각의 독립적인 듀티사이클 스케줄로 동작하는 방식이므로 송신 노드는 데이터 전송 시 수신 노드가 언제 활성화 되는지 알 수 없다. 따라서 송신 노드는 데이터가 전송 버퍼에 들어온 순간부터 수신 노드가 주소를 확인하고 열리 액세스를 전송할 때 까지 계속해서 짧은 프리엠블을 전송하게 된다. 이러한 비동기 방식 프로토콜의 동작 방법은 그림 4와 같이 최악의 경우에 송신 노드가 수신 노드의 슬립구간 동안 계속해서 프리엠블을 전송하게 되기 때문에 이에 따른 에너지 낭비가 심할 수 있다.

이와 같은 문제점을 해결하고자 송신 노드와 수신 노드의 듀티사이클 스케줄을 데이터 전송 주기와 프리엠블 넘버를 통하여 동기화 시키는 가상동기화 기법을 제안한다.

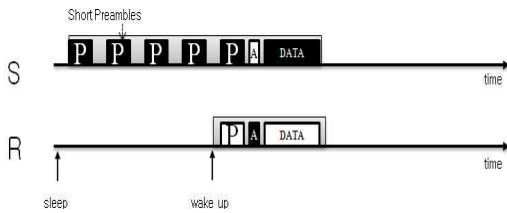


Fig 4. A problem of continuous short preamble
그림 4. 연속적인 짧은 프리엠블의 문제점

가상동기화 기법은 송신 노드가 자신의 데이터 전송 주기와 프리엠블의 번호를 프리엠블에 같이 보냄으로써 이 정보를 이용하여 수신 노드가 자신이 수신한 프리엠블이 수신 노드의 최초 프리엠블에서 몇 번째 프리엠블인지를 유추해 낼 수 있으며, 전송받은 데이터 전송 주기를 가지고 송신 노드의 듀티사이클 스케줄을 재조정함으로써 최초의 데이터 전송 이후에 수신 노드와 송신 노드의 듀티사이클 동기를 대략적으로 맞출 수 있다. 이 기법을 사용하기 위해 무선 센서 네트워크의 데이터 흐름 패킷을 활용한다. 가상동기화 기법을 사용한다면 송신 노드의 프리엠블의 전송 횟수를 줄일 수 있다.

가상동기화 기법을 위하여 먼저 송신 노드는 프리엠블을 전송할 시에 각각의 프리엠블에 번호를 부

여하는 프리엠블 넘버링(Preamble Numbering) 기법을 이용한다. 프리엠블 넘버링 기법은 프리엠블을 전송하기 전에 각각의 프리엠블에 순서대로 번호를 부여하여 전송함으로써 수신 노드가 이 번호를 이용하여 송신 노드가 전송받은 프리엠블이 최초의 프리엠블 전송에서 얼마나 시간이 걸렸는지 유추 할 수 있으며 이를 이용하여서 송신 노드와 수신 노드의 듀티사이클 스케줄을 동기화 시킬 수 있는 역할을 한다. 프리엠블 넘버링 기법을 이용하여 각 송신 노드는 자신의 데이터 전송 인터벌과 프리엠블 번호를 프리엠블에 포함하여 보낸다. 이때 각각 데이터 전송 인터벌(1 byte), 프리엠블 번호(1 byte) 모두 2 byte의 추가적인 정보만 필요로 한다. 따라서 가상동기화 기법은 기존의 동기화 프로토콜이 동기화를 위하여서 추가적인 동기화 패킷을 사용하는 것에 비해 에너지 소모를 줄일 수 있으며 적은 오버헤드만으로 두 노드 사이의 동기화를 가상으로 이룰 수 있다.

수신노드는 송신노드에서 전송한 프리엠블 안에 있는 전송 인터벌과 프리엠블 번호 정보를 기반으로 수신노드의 전송 스케줄에 가상동기화 기법을 통하여 동기를 맞춘다. 이때의 동기화 즉 가상동기화는 동기화 방식에서 동기화 패킷을 이용한 센서 네트워크 전체적인 동기화처럼 정확한 동기화를 이룰 수는 없지만 대략적인 동기화를 이루게 됨으로써 동기화 기능이 없는 기존의 X-MAC 프로토콜에 비하여 프리엠블의 전송 횟수를 줄일 수 있으며 이에 따라서 에너지 효율을 증가시킬 수 있다.

그림 5는 가상동기화 기법의 동작과정으로 가상동기화를 적용 하였을 때의 동작과정을 나타낸다. 그림에서 보이는 것과 같이 가상동기화 시점 이전의 전송 과정에 비하여 적은 수의 프리엠블의 전송만으로 성공적인 통신을 할 수 있다. 따라서 다수의 프리엠블 전송에 따른 에너지 소모를 줄일 수 있다.

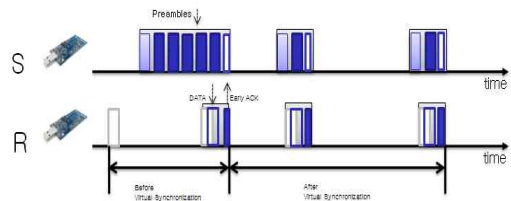


Fig 5 Virtual Synchronization technique
그림 5 가상동기화 기법의 동작과정

가상동기화 기법에서 송신노드의 다음번 전송을 예측하기 위하여 $I - ((L \times (N - 1)))$ 의 계산방법으로 동기화 시점 계산이 이뤄진다. 수식에서 I는 프

리엨블을 통하여 송신 노드로부터 전송받은 데이터 전송 주기이며, N은 송신 노드로 부터의 프리엨블 전송 횟수 즉 프리엨블 넘버를 나타내며, L은 전송속도에 따른 한 개의 프리엨블 전송에 소모되는 시간을 나타낸다. 프리엨블의 번호 N을 이용하여 송신 노드에서 몇 번의 프리엨블 전송이 시도 되었는지 유추해 낼 수 있으며, 이를 이용하여 송신노드가 데이터가 전송 큐에 들어 온 이후에 최초의 프리엨블 전송 시간에서 부터 송신노드가 데이터 전송을 완료 하였을 때까지의 시간을 유추해 낼 수 있다. 이를 통하여서 다음번 송신노드의 데이터 전송 시간을 알 수 있다.

2. 에너지 효율적인 MAC 프로토콜 구현

본 연구에서는 본 논문에서 제안한 가상동기화 기법을 추가한 X-MAC을 구현하기위하여 오픈소스 기반의 센서 네트워크를 위한 운영체제인 TinyOS를 기반으로 하여서 센서 플랫폼인 TelosB 센서 모드를 이용하여 구현하였으며 TinyOS의 특징은 아래의 표 1과 같다.

Table 1. Features of TinyOS

표 1. TinyOS 의 특징

항목	특징
language	nesC
kernel	없음
process management	없음
memory management	없음
기타	- event driven - 적은 코드 사이즈 - single Shared stack

본 논문에서 사용되는 X-MAC 프로토콜은 TinyOS contribution 소스인 MLA(MAC Layer Architecture) X-MAC 프로토콜을 이용하여 구현하였다. MLA(MAC Layer Architecture) 방식은 워싱턴 대학에서 제안한 TinyOS contributing 소스로써 기존의 TinyOS의 MAC 프로토콜은 그림 6과 같은 단일 방식의 구조를 가지는 반면에 MLA MAC 프로토콜은 그림 7과 같은 컴포넌트 기반의 구조를 가진다. 기존의 MAC 프로토콜은 MAC 프로토콜이 하나의 컴포넌트로 구성되어 있기 때문에 새로운 MAC 프로토콜 개발과 관리가 어려우며 효율적이지 못하다. 하지만 컴포넌트 기반으로 만들어진 MAC 프로토콜은 각각의 컴포넌트에 MAC의 기능들이 정의되어 있기 때문에 프로토콜의 관리와 개발이 편리하다.

따라서 MLA 구조를 이용하면 추가되는 기능의 컴포넌트만 정의하면 되기 때문에 개발에 용이 하다. MLA는 LPL(Low Power Listening) listener, channel poller와 같은 하드웨어에 독립적인 컴포넌트들과 Radio power control, CCA(Clear Channel Assessment) control과 같은 하드웨어에 종속적인 컴포넌트들로 구분된다. MLA 구조를 사용하면 새로운 플랫폼에 대한 MAC 구현에 있어서 하드웨어 종속적인 부분만 변경하면 되고 다양한 MAC 프로토콜에 대한 편리한 지원과 같은 이점이 있기 때문에 본 논문에서는 가상동기화를 추가하여 에너지 효율성을 높인 X-MAC 구현을 위하여 MLA구조를 사용하였다.

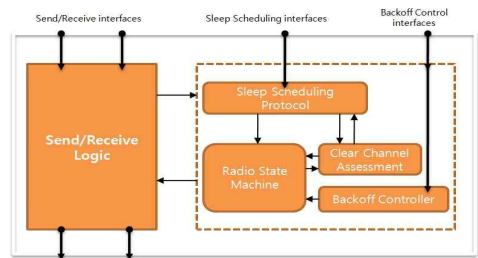


Fig 6. Monolithic Radio Stack based MAC protocol structure

그림 6. Monolithic Radio Stack 기반의 MAC 프로토콜 구조

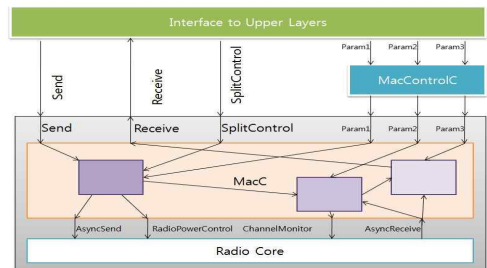


Fig 7. MAC Layer Architecture structure

그림 7. MAC Layer Architecture 구조

가. MLA X-MAC 특징 및 구조

MLA X-MAC 프로토콜은 그림 8과 같은 구조를 가진다. MLA MAC 프로토콜은 원래의 X-MAC 프로토콜[8]과는 다른 구조를 갖는다. 이는 그림 9와 같이 원래의 X-MAC프로토콜이 짧은 프리엨블을 사용

하는 반면에 MLA X-MAC 프로토콜은 데이터를 복사해서 프리앰블로 사용하는 구조를 가진다. 이와 같은 방식을 사용하는 이유는 현재 많은 센서 모드에서 사용되어 지고 있는 라디오칩인 Chipcon 사의 CC2420이 패킷 라디오 기반의 칩인 이유이다. 따라서 기존의 CC1000과 같은 바이트 라디오 기반의 칩이 바이트별로 나누어서 전송을 할 수 있었지만 패킷 기반의 CC2420은 패킷 단위로만 전송을 하기 때문이다. 본 논문에서는 제안하는 MAC 프로토콜의 구현을 위하여 CC2420 라디오칩을 사용하는 TelosB 모드를 사용하였으며 이에 따라서 MLA X-MAC 구조를 사용하여 구현하였다.

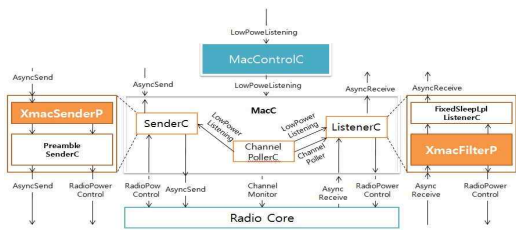


Fig 8. X-MAC protocol structure based on MLA
 그림 8. MLA로 구현한 X-MAC 프로토콜 구조

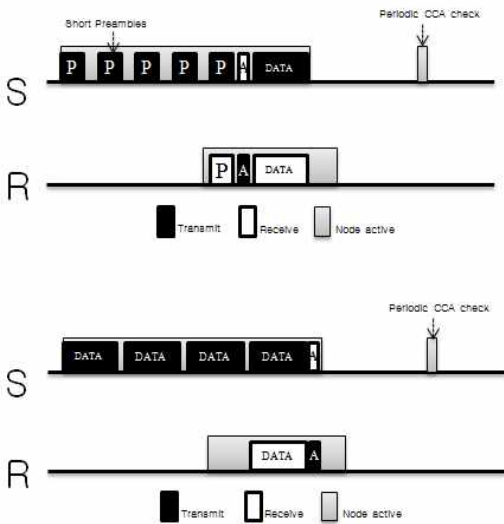


Fig 9. A Comparison of X-MAC protocol and MLA X-MAC protocol
 그림 9. X-MAC과 MLA X-MAC protocol의 비교

나. 프리앰블 넘버링 컴포넌트

가상동기화 기법을 위하여 송신 노드에서는 프리앰블 넘버링 기법을 사용하였다. 프리앰블 넘버링 기법을 구현하기 위하여 먼저 MLA X-MAC 프로토콜의 전송 구조를 알아야한다. 그림 10과 같이 MLA X-MAC 프로토콜은 어플리케이션에서 전송되는 데이터를 preambleSender 컴포넌트가 복사하여 프리앰블을 만들어준다. 또한 AsyncSendAdapter 컴포넌트를 통하여서 라디오칩 바로 위에 있는 CC2420 Transmit 컴포넌트에서 최종적으로 데이터를 전송하게 된다. 따라서 가상동기화 기법을 위하여서 송신 노드의 프리앰블 기법은 CC2420Transmit 컴포넌트에서 데이터를 전송하기 전에 각각의 프리앰블에 번호를 부여하여 전송하게 된다.

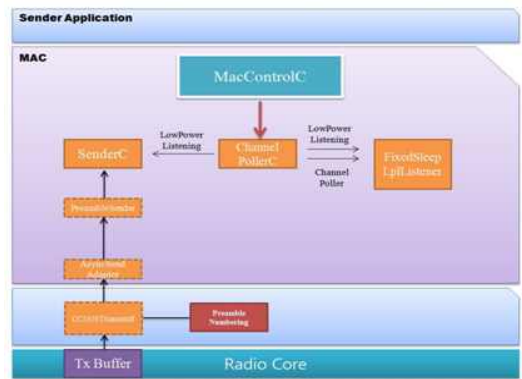


Fig 10. Preamble numbering technique component
 그림 10. 프리앰블 넘버링 기법 컴포넌트

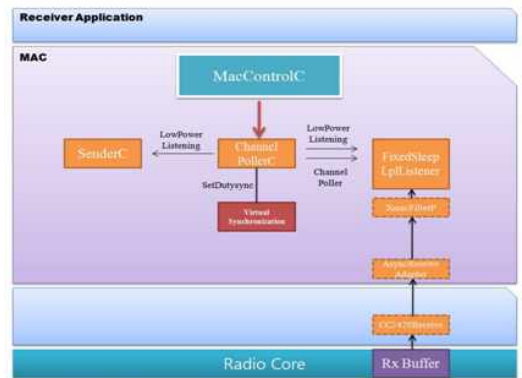


Fig 11. Virtual Synchronization component
 그림 11. 가상동기화 기법 컴포넌트

다. 가상동기화 컴포넌트

가상동기화 기법을 이용하는 수신노드는 그림 11과 같다. MLA X-MAC 프로토콜은 송신 노드와는 반대로 라디오 칩 위에 있는 CC2420Receive 컴포넌트와 AsyncReceiveAdapter 컴포넌트 XMACFilter 컴포넌트를 통하여서 어플리케이션으로 데이터를 전달한다. 이때 Channel Poller 컴포넌트는 송신노드의 LPL 기능을 수행하는데 이 Channel Poller 컴포넌트에 가상동기화 컴포넌트를 추가 하였다.

IV 성능 분석

본 논문에서는 에너지 효율성이 높은 센서 MAC 프로토콜을 설계하고 성능분석을 위하여 Chipcon사의 CC2420 라디오를 사용하는 TelosB 센서 모드를 이용하여 실내에 구축한 테스트 베드에서 실험하였다. TelosB 센서 모드 플랫폼은 802.15.4 표준을 따르는 디바이스로서 250kbps의 전송률을 지원하며 2.4GHz ISM 밴드 대역에서 동작한다. 센서 모드는 8MHz TI MSP430을 사용하며, 1 MB의 외부 플래시 메모리를 가진다. 에너지 효율 측정을 위하여 실험에 사용된 Chipcon사의 CC2420 라디오는 에너지 소비 표는 다음과 같다.

Table 2. Parameter of Energy consumption

표 2. 에너지 소모 파라미터

operation	TelosB
Minimum Voltage	1.8V
Mote Standby (RTC ON)	5.1 μ A
MCU Idle(DCO ON)	54.5 μ A
MCU Active	1.8 mA
MCU + Radio RX	21.8 mA
MCU + Radio TX(0 dBm)	19.5 mA
MCU + Flash Read	4.1 mA
MCU + Flash Write	15.1 mA
MCU Wakeup	6 μ s
Radio Wakeup	580 μ s

위 표 2를 바탕으로 3V 배터리를 사용하였을 때 TelosB 센서 모드에서 데이터 패킷 한 개의 송신과 수신시 소모하는 에너지 소비율을 계산 하였으며 다음 표 3과 같다.

본 논문에서 제안하는 가상동기화 기법을 추가한 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 성능 분석을 위하여서 센서용 OS인 TinyOS를 사용 하였으며, 에너지 소비 효율 비교를 위하여서 실험에서는 3장에서 언급한 MLA(MAC Layer Architecture) 방식의 X-MAC

Table 3. TelosB mote에서 송수신시 에너지 소모

표 3. TelosB mote에서 송수신시 에너지 소모량

operation	Current consumption	Average Power Consumption	Energy per 1 Packet
Tx	19.5 mA	58.5 mW	1.176 J
Rx	21.8 mA	65.4 mW	1.308 J

프로토콜과 본 논문에서 제안하는 가상동기화 기법을 비교하여 에너지를 측정하였다. 먼저 단일 홉 전송 상에서의 X-MAC 프로토콜과 가상동기화 기법을 추가한 프로토콜의 에너지 소비량을 측정하였다. 에너지 소모는 표 3을 기준으로 측정하였으며 실험환경은 초당 1개의 패킷을 3초의 간격으로 20개의 패킷을 보냈을 때 에너지 소비량을 측정했다.

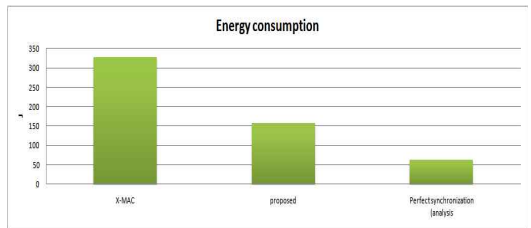


Fig 12. A Comparison of proposed MAC protocol and X-MAC protocol Energy consumption

그림 12. 제안한 프로토콜과 X-MAC 과의 에너지 소비량 비교

그림 12는 각 프로토콜에 따른 에너지 소비량을 나타낸 것으로써 가장 왼쪽이 기존의 X-MAC이고 가운데가 본 논문에서 제안한 기법, 그리고 마지막이 가장 이상적인 상태(Perfect Synchronization), 즉 완벽한 동기화가 맞은 상태이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 기존의 X-MAC 프로토콜보다 가상동기화 기법을 적용한 MAC프로토콜이 에너지 소모가 더 적은 것을 확인 할 수 있었다. 그래프에서 동기가 완벽하게 일치 하였을 때의 값은 가상동기화 기법을 통하여서 송신노드와 수신노드의 동기가 완벽하게 일치했을 때의 값을 분석적으로 나타낸 것이다.

그림 13과 그림 14는 각각 멀티 홉 환경에서 에너지 소비량과 레이턴시의 측정 결과를 나타낸 그래프이며 그래프에서 확인 할 수 있듯이 싱글 홉과 마찬가지로 기존의 X-MAC 프로토콜에 비하여서 가상동기화 기법을 적용한 MAC프로토콜이 동기화 효과로 인한 프리엠블 전송량의 감소로 인하여 에너지소비량

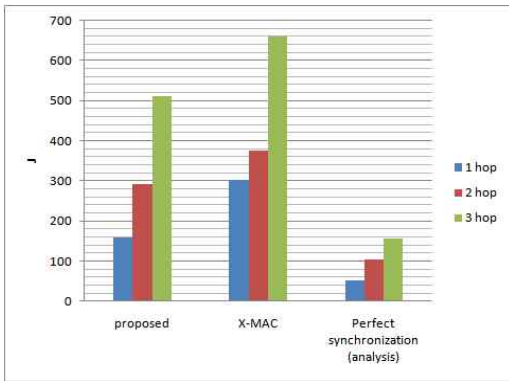


Fig 13. A Comparison of proposed MAC protocol and X-MAC protocol Energy consumption
 그림 13. 제안한 프로토콜과 X-MAC 과의 에너지 소비량 비교

과 레이턴시가 더 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 그래프에서 동기가 완벽하게 일치하였을 때의 값 (Perfect Synchronization)은 가상동기화 기법을 통하여서 송신노드와 수신노드의 동기가 완벽하게 일치하였을 때의 값을 분석적으로 나타낸 것이다. 본 논문에서 제안한 동기화 기법은 동기화 패킷을 이용하지 않고 또한 운영체제 자체의 인터럽트 등에서 오는 지연 때문에 분석적으로 계산한 값과는 차이가 있다. 하지만 기존의 X-MAC 프로토콜보다는 보다 적은 에너지 소비량과 레이턴시를 가진다.



Fig 14. A Comparison of proposed MAC protocol and proposed MAC protocol latency
 그림 14. 제안한 프로토콜과 X-MAC 과의 레이턴시 비교

V 결론

본 논문에서는 저속 센서 네트워크에서 가장 중요한 요소인 에너지 효율성을 높이고자 기존보다 높은 에너지 효율을 가지는 센서 MAC 프로토콜을 설계하였다. 이를 위해서 추가적인 컨트롤 패킷 오버헤드와 스케줄링 오버헤드를 가지는 동기식 방식에서 사용되는 동기화를 위한 오버헤드가 제거된 비동기 방식을 채택하였으며, 프리엠블내에 아주 적은 오버헤드 (2byte)만을 추가하여 에너지 소비의 가장 큰 영향을 미치는 아이들 리스닝을 가상동기화 기법을 적용했다. 이를 통하여 비동기 방식의 X-MAC을 기반으로 송수신 노드간의 가상 동기화를 이루어 송신되는 프리엠블의 횟수를 줄여 에너지 효율성을 높이도록 하였고, 이를 실험을 통하여 확인하였다. 하지만 X-MAC을 기반으로 설계하였기 때문에 네트워크의 데이터 발생률이 높은 상황에서는 문제가 되는 것을 고려해야한다. 또한 실질적인 SYNC 패킷을 사용하지 않는 문제점 때문에 전송상의 홉 수가 늘어날수록 동기화의 효율이 낮아짐으로 인하여 에너지 낭비의 요인이 될 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 황호영 외. "무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜에 대한 동향 및 분석", *Telecommunications Review*, 제 14권 6호, pp.918-935, 2004.
- [2] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagöz, "MAC Protocol for Wireless Sensor Network: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, pp.115-121, April 2006.
- [3] Yanjun Sun, Omer Gurewitz, and David B. Johnson, "RI-MAC: A Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks", In *The 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, November, 2008.
- [4] Wei. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medimu Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, Volume12, pp.493-506, June 2004.
- [5] Tijs van Dam,. "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *Conference On Embedded Networked Sensor*

Systems, pp.171-180, 2003.

- [6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In The Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'02), pages 95 - 107, November 2004.
- [7] Michael Buettner, Gary V Yee, Eric Anderson, Richard Han. "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol For Duty-Cycled Wireless Sensor Networks", Conference On Embedded Networked Sensor Systems, pp.308-320, 2006.
- [8] 변강호.. "무선 센서 네트워크를 위한 효율적인 프리엠프 샘플링 기법을 사용하는 비동기 MAC의 성능 분석", 전자공학회논문지, pp70-77, 2007.

강 석 중 (정회원)



1988년 : Indiana University (공학사)
 1991년 : Indiana University (공학석사)
 2003년 : University of California (공학박사)
 2006년 ~ 현재 : 광운대학교
 컴퓨터과학과 부교수
 <주관심분야> 분산실시간시스템, 소프트웨어공학, 모델링&시뮬레이션

저 자 소 개

박 인 혜 (학생회원)



2008 : 광운대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2010년 : 광운대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2010년~현재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 박사과정
 <주관심분야> 무선센서네트워크, 멀티홉 무선통신, 전술데이터링크

이 형 근 (정회원)



1987년 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 : Syracuse University 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2002년 : Syracuse University 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2003년 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 부교수
 <주관심분야> 무선센서네트워크, 멀티홉 무선통신, 전술데이터링크