

회귀적 추정 방식을 이용한 무선 센서 네트워크용 저전력 MAC 프로토콜

박 우 길*

Low Power MAC Protocol Design for Wireless Sensor Networks using Recursive Estimation Methods

Wooguil Pak*

요 약

무선 센서 네트워크에서 가장 중요한 이슈는 에너지 소모이다. 초저전력 통신을 위해서, 동기 주기에 따른 클럭 편차 에러에 대한 실험 결과를 이용하여, 지연 조건이 크지 않으며 모니터링 간격이 큰 분야에 적합한 새로운 MAC (Medium Access Control) 프로토콜을 디자인하였다. 제안 방식은 전송 패킷이 발생할 때 동기를 수행하는 방식이며, 동기 주기에 따라 그에 맞는 동기 에러에 대한 크기를 예측할 수 있다. 따라서 제안 방식은 기존 프로토콜들이 낮은 충격 계수 환경만을 지원하는 것과 달리, 초저 충격 계수 환경까지 지원할 수 있기 때문에 트래픽이 매우 낮은 초저전력, 높은 수명을 요구하는 분야에 사용될 수 있다. 제안 프로토콜의 성능을 평가하기 위해서 테스트베드를 구현하였으며, 관련 프로토콜들과 성능을 비교 하였고, 이를 통해 SCP-MAC 대비 80% 정도 에너지 소모량을 줄일 수 있음을 보였다. 제안 프로토콜은 매우 긴 네트워크 수명을 필요로 하며 지연 조건이 강하지 않은 무선 모니터링 분야 등에 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

Key Words : Wireless sensor network, low power MAC protocol, long lifetime, Recursive estimation

ABSTRACT

In the context of wireless sensor networks, one of major issues is energy conservation. For low power communication, by utilizing our experimental results for the relation between clock drift and synchronization interval, we designed a new protocol which can support a wide range of duty cycles for applications with very low traffic rate and insensitive delay. The transmission (TX) node in the protocol synchronizes with the reception (RX) node very before transmitting a packet, and it can adaptively estimate the synchronization error size according to the synchronization interval from minutes to hours. We conducted simulations and a testbed implementation to show the efficacy of the proposed protocol. We found that our protocol substantially outperforms other state-of-the-art protocols, resulting in order-of-magnitude increase in network lifetime over a variety of duty cycles.

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 비용이 저렴하면서 유지 보

수비용이 매우 작기 때문에 무선 센서 네트워크는 환경 모니터링, 빌딩 정보 시스템, 원격 검침 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이를 위해 무선 센서 네트워

* First Author : 계명대학교 보안 및 무선네트워크 연구실, wooguilpak@knu.ac.kr, 정회원
논문번호: KICS2013-11-498, Received November 15, 2013; Reviewed January 7, 2014; Accepted March 7, 2014

크에서 에너지 소모를 최소화하여 네트워크 수명을 최대화하기 위한 다양한 기술들이 개발되어 왔다. 무선 센서 네트워크는 각 응용 분야에 따라, 트래픽 특성, 지연 조건, 데이터 전송 속도에 대한 다양한 요구 조건을 만족하여야 한다. 따라서 이를 위해 다양한 특성의 저전력 MAC (Medium Access Control) 프로토콜들이 개발되고 제안되어 왔다.

일반적으로 에너지 소모를 줄이기 위해서 무선 센서 네트워크에서 사용되는 방식은 주기적으로 sleep, wakeup을 반복하는 것이다. 대부분의 센서 노드의 클럭 속도는 서로 다르며 환경 변화에 따라 서로 다른 클럭 편차가 발생한다. 따라서 MAC 프로토콜이 패킷 전송을 위해서는 수신 노드의 wakeup 시간을 추정하는 것이 필수적이다.

이를 해결하는 방법에 따라 MAC은 크게 동기식과 비동기식으로 구분될 수 있다. 하지만 동기식의 경우 주기적인 동기에 의해 발생하는 높은 에너지 소모 때문에, 비동기식의 경우에는 패킷 전송 시 송신 노드의 과도한 에너지 소모 때문에 저 전력 프로토콜을 디자인하는 것은 매우 어려운 일이다. 두 방식 모두 실제 데이터 패킷을 전송하기 위해 소모되는 에너지양보다 수신 노드의 wakeup 시간을 찾는 데 소모되는 에너지 양이 훨씬 크게 된다. 따라서 MAC 프로토콜의 에너지 소모를 더욱 줄이기 위해서는 클럭 소스의 특성에 대한 연구가 필수적이다.

이를 위해서 지금까지 많은 기존 클럭 소스에 대한 다양한 연구들이 이루어졌으며 많은 특성들이 밝혀졌다. 특히, 동기 간격이 길어질수록 두 노드 간의 클럭 오차는 커지지만, 클럭 오차와 동기 간격의 비율은 시간에 따라 오히려 감소 혹은 유지된다는 특성은 저 전력 MAC 프로토콜을 디자인하는데 있어서 매우 중요한 해법을 제시한다. 예를 들어 10초에 한번씩 상대 노드의 wakeup 시간을 추정할 경우 보다 10분에 한번씩 상대 노드의 wakeup 시간을 추정할 경우, wakeup 시간의 오차가 큰 것은 당연하다.

하지만 각 오차를 각 추정 주기로 나눈 값은 10분의 경우가 오히려 작게 된다. 동기 프로토콜의 에너지 소모량은 이 나눈 값과 관계가 크기 때문에 에너지 소모 측면에서는 10분에 한번씩 추정하는 것이 유리하다고 말할 수 있다. 따라서 에너지 소모를 최소화하기 위해서는 SCP-MAC^[6]이나 WiseMAC^[7]과 같이 전송 패킷이 발생할 때 수신 노드의 wakeup 시간을 추정하는 하이브리드 방식이 가장 유리하다.

하지만 에너지 소모라는 측면에서 볼 때 하이브리드 MAC 역시 개선될 수 있는 여지가 많다. 최대 클

럭 편차율을 이용하여 얻은 하이브리드 방식의 마진은 두 노드간의 클럭 속도 차와 환경 변화에 의해 발생하는 클럭 편차를 모두 포함하는 값이어야 한다.

일반적으로 클럭 속도 차이는 추정이 쉬우며 시간에 따라 매우 느리게 바뀌기 때문에 이로 인해 발생하는 오차 또한 쉽게 추정할 수 있다. 따라서 최대 클럭 편차율을 이용하는 것은 불필요하게 큰 마진을 추정하는 결과를 낳게 되어 에너지 낭비를 발생하게 된다.

이를 해결하기 위해서는 실제 클럭 편차를 온라인으로 추정할 수 있는 비주기적 동기 알고리즘 및 프로토콜이 필요하다. 본 논문에서는 클럭 편차와 동기 주기에 따른 특성에 대한 기존 연구 결과를 이용하여, 기존 하이브리드 방식과 유사하면서 에너지 소모량을 크게 향상시킨 MAC 프로토콜을 제안하고자 한다.

제안 방식은 데이터 패킷을 전송할 때마다 추정 오차에 대한 상한선을 얻음으로써 노드의 wakeup 시간을 최소화하여 에너지 소모를 줄이게 된다. 이를 위한 핵심 기술은 오차 추정을 위한 회귀적 방법에 기반한 알고리즘으로 다양한 크기의 동기 간격과 오차 크기에 대한 데이터를 이용하여 최대 오차 크기를 동기 간격에 대한 1차 함수로 표현하는 것이다.

이 경우 정확한 오차 추정을 위해서 많은 데이터와 메모리가 필요하지만 회귀적 알고리즘을 이용함으로써 매우 적은 메모리만을 사용하면서도 높은 정확성을 보이게 된다^[1].

제안 프로토콜은 최대 클럭 편차율을 이용하는 방식에 비해 수 배 이상 에너지 소모를 줄일 수 있으므로 다양한 환경에서 사용될 수 있다. 많은 프로토콜들이 충격 계수가 낮아질수록 즉 wakeup 간격이 길어질수록 에너지 소모량이 증가하는 등의 문제가 발생하지만, 제안 방식을 사용하면 wakeup 간격이 길어질수록 오히려 에너지 소모량이 감소한다. 따라서 매우 드물게 데이터가 발생하는 이벤트 드리븐 방식이나 패킷 전송 주기가 수분에서 수 시간인 매우 긴 모니터링^[1]을 비롯한 다양한 무선 네트워크에 적용가능하다^[13].

II장에서는 관련 연구를 살펴보고 III장에서 제안 방식에 대해서 설명하기로 한다. 이 후 IV장에서 제안 방식에 대한 성능을 분석하기 위해 테스트베드 상에서 다양한 알고리즘들을 구현하여 얻은 비교 결과를 설명하고 V장에서 결론을 맺기로 한다.

1) 대표적인 예로 가스나 전기, 수도에 대한 원격 검침 (AMR, automatic meter reading)의 경우, 검침 주기는 한 시간 단위로 설정 되기 때문에 한 시간 이상의 모니터링 주기를 갖는다.

II. 관련 연구

동기식 MAC 프로토콜에는 대표적으로 S-MAC과 CMAC이 있다^{2,3}. 이들 프로토콜은 글로벌 동기 방식을 사용하기 때문에 많은 제어 패킷이 필요하며 wakeup 구간 중 많은 부분이 동기에 사용된다. 대신 각 노드들은 클럭 편차 등에 대한 고려 없이 패킷 전송을 수행할 수 있기 때문에 상위 계층에서 필요한 기능을 구현하는 것이 용이하다.

대부분 동기 프로토콜들은 일정 주기마다 반복적으로 동기를 수행하는 방식이다. 많은 동기 프로토콜들은 직선 회귀 (linear regression)을 이용하며 다음과 같이 실제 샘플 값과 추정 값의 차이를 최소화하기 위한 클럭 속도의 비 e_i 와 클럭 오프셋 d_i 를 구하게 된다.

$$\bar{t}_i = e_i \cdot t_i + d_i \quad (1)$$

여기서 t_i 와 \bar{t}_i 는 각각 전송 노드와 수신 노드의 클럭을 기준으로 표현된 시간값이다. 추정된 wakeup 시간과 실제 wakeup 시간의 오차를 동기 허용 오차 이하로 유지하기 위해서는 동기 주기는 데이터 주기에 비해 상대적으로 짧게 된다. 따라서 전송 패킷이 없는 경우에도 소모되는 에너지가 높다는 단점이 있다.

비동기식 MAC 프로토콜은 패킷을 전송하기 전에 송신 노드가 수신 노드의 wakeup 시간을 찾는 방식이다. 대표적인 프로토콜들은 X-MAC과 RI-MAC이 있다^{4,5}. 일반적으로 패킷 수신 보다 패킷 전송 시 에너지 소모가 매우 크게 되며, 그 소모량은 패킷 전송율과 wakeup 구간에 비례하게 된다. 반면 구현이 간단하기 때문에 패킷 전송이 매우 드물며 wakeup 구간이 짧은 환경에 적합하다고 할 수 있다.

최근에는 SCP-MAC이나 WiseMAC과 같은 하이브리드 방식이 소개되었다^{6,7}. 이들은 동기식과 비동기식의 장점을 합친 방식으로 처음에는 비동기식으로 동작하지만 이후에는 최근 전송 시간에 대한 정보와 최대 클럭 편차를 이용하여 동기식으로 동작하는 방식이다⁸.

최대 클럭 편차율 θ 는 크리스털 혹은 진동자의 정확도를 나타내는 값으로 만일 기본 주파수가 f 이면 실제 주파수는 $f \cdot \theta$ 에서 $f \cdot \theta$ 사이에 존재하게 된다. 따라서 최대 오차 크기 $m(\cdot)$, 즉 마진의 크기는 다음과 같이 주어진다⁹.

$$m(\Delta t) = 2 \theta \Delta t. \quad (2)$$

여기서 Δt 는 패킷 전송 간격 혹은 동기 주기이다. 이 마진으로부터 우리는 전송 노드의 평균 에너지 소모량이 최대 클럭 편차율에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 즉

$$\frac{2\theta \Delta t}{\Delta t} = 2\theta. \quad (3)$$

이는 곧 총 에너지 소모량은 sleep 간격에 반비례한다는 것을 의미한다. 결국 충격 계수(duty cycle)를 낮추면 네트워크 수명을 연장할 수 있다.

III. 무선 센서 네트워크를 위한 저전력 MAC 프로토콜

제안 프로토콜은 자연 조건이 크지 않은 환경에서 매우 낮은 에너지 소모량을 갖는 프로토콜이다. 간단하지만 효율적인 wakeup 시간 및 동기 에러 크기에 대한 회귀 기반의 추정 알고리즘을 사용하며 메모리 사용량이 작기 때문에 현재 존재하는 대부분의 센서 노드에서 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다. 또한 지원 가능한 충격 계수가 매우 넓다는 특징이 있다. 이를 위해 제안 방식은 클럭 속도를 추정하는 알고리즘과 그에 따른 마진 크기를 추정하는 알고리즘을 사용한다.

3.1 클럭 속도 추정 알고리즘

제안 프로토콜은 SCP-MAC, WiseMAC과 같은 하이브리드 프로토콜로서 에너지 소모량을 줄이고, 정확한 동기 에러의 크기를 추정하기 위해서 적응적 추정 알고리즘을 사용한다. 동작 초기 및 동기에 실패한 경우에는 기존 SCP-MAC이나 WiseMAC과 동일하게 상대 노드의 wakeup 시간을 추정하기 위해서 최대 클럭 편차율을 사용한다.

하지만 송신 노드가 일단 수신 노드의 wakeup 시간을 알게 되면 패킷을 전송 시 이미 알고 있는 수신 노드의 wakeup 시간에 대한 정보를 이용하여 수신 노드의 wakeup 시간을 추정하고 실제 wakeup 시간과 추정 시간과의 오차에 대한 크기를 예측하므로 효율적으로 동기를 수행하게 된다.

송신 노드는 (t_i, ϵ_i) 쌍에 대한 과거 데이터들을 토대로 상대 클럭 속도를 얻기 위해서 회귀적 추정 알고리즘을 사용한다¹¹. 여기서 ϵ_i 는 i 번째 추정된 wakeup 시간의 에러 크기를 말한다.

설명을 간단히 하기 위해서 한 쌍의 송신 노드와

수신 노드가 존재한다고 가정하기로 한다. 이 가정은 다수의 송신, 수신 노드의 경우로 쉽게 확장할 수 있다. 알고리즘에 대한 설명을 하기 전에 다음 기호들을 정의하기로 한다.

- n : 총 전송된 패킷 수
- t_n : 전송 노드의 클럭 기준으로 수신 노드의 wakeup 시간
- t_n^* : 전송 노드의 클럭 기준으로 수신 노드의 추정된 wakeup 시간
- Δt_n : $t_n - t_{n-1}$
- τ_n : 수신 노드의 클럭 기준으로 수신 노드의 wakeup 시간
- τ_n^* : 수신 노드의 클럭 기준으로 수신 노드의 추정된 wakeup 시간
- m_n : 마진 크기
- ϵ_n : 추정된 wakeup 시간의 에러 크기
- e_n : 추정된 수신-수신 노드의 클럭 라인의 기울기

그림 1은 제안방식에서 수신 노드의 wakeup 시간을 어떻게 추정하는지를 간단하게 보여준다. wakeup 주기를 알고 있는 경우, e_n 으로부터 t_{n+1}^* 을 얻게 된다. 그 결과 그림에서처럼 송신 노드는 $t_{n+1}^* - m_{n+1}$ 에서 $t_{n+1}^* + m_{n+1}$ 까지만 깨어 있게 된다.

기존 wakeup 시간에 대한 정보를 활용하여 다음 wakeup 시간을 추정하기 위해서 다음 방법을 이용할 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} & \arg \min_{e_n, d_n} \left\{ \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} (t_i - t_i^*)^2 \right\} \\ & = \arg \min_{e_n, d_n} \left\{ \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} (t_i - e_n \tau_i - d_n)^2 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

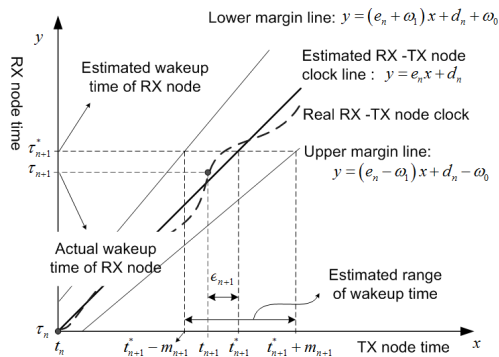


그림 1. wakeup 시간 및 마진 크기 추정
Fig. 1. Estimation for wakeup time and margin size.

여기서 $t'_i = e_n \tau_i + d_n$ 이다. 또한, e_n 과 d_n 는 다음과 같이 정의된다.

$$e_n = \frac{S_n^\tau S_n^{\tau\tau} - S_n^1 S_n^{\tau\tau}}{(S_n^\tau)^2 - S_n^{\tau^2} S_n^1}, \quad d_n = \frac{S_n^\tau S_n^{\tau\tau} - S_n^{\tau^2} S_n^1}{(S_n^\tau)^2 - S_n^{\tau^2} S_n^1}$$

그리고

$$\begin{aligned} S_n^\tau &= \sum_{k=1}^n \gamma^{n-k} \tau_k = \gamma S_{n-1}^\tau + \tau_n \\ S_n^1 &= \sum_{k=1}^n \gamma^{n-k} = \gamma S_{n-1}^1 + 1 \\ S_n^{\tau^2} &= \sum_{k=1}^n \gamma^{n-k} \tau_k^2 = \gamma S_{n-1}^{\tau^2} + \tau_n^2 \\ S_n^{\tau\tau} &= \sum_{k=1}^n \gamma^{n-k} \tau_k \tau_k = \gamma S_{n-1}^{\tau\tau} + \tau_n t_n \end{aligned} \quad (6)$$

이다.

이방식의 장점은 (5)의 해를 구하기 위해 필요한 (6)이 회귀식으로 표현되기 때문에 매우 낮은 계산 비용과 메모리 사용량만으로도 (5)의 해를 구할 수 있다는 것이다. 전체적인 wakeup 시간 추정 알고리즘의 전체적인 과정은 다음과 같다.

Algorithm 1 wakeup 시간 추정.

- 1 : $e_1 = 1, n = 1$
- 2 : Find d_1 from the initial packet transmission.
- 3 : **loop**
- 4 : $\tau_{n+1}^* = e_n t_{n+1}^* + d_n$
- 5 : Send a packet according to τ_{n+1}^* .
- 6 : **if** success
- 7 : Find t_{n+1} .
- 8 : Calculate e_{n+1} and d_{n+1} from (5).
- 9 : $n \leftarrow n + 1$
- 10 : **end if**
- 11 : **end loop**

3.2 마진 추정

마진 추정의 목적은 패킷 전송을 성공적으로 하기 위해서 동기에 필요한 최소한의 마진 크기를 찾는 것이다. 동기 주기가 충분히 짧은 경우에는 wakeup 시간 추정 시 에러가 무시할 만큼 작게 된다. 하지만 기존 연구 결과에 따르면 에너지 소모량 측면에서는 매

우 비효율적인 방법이다.

앞서 설명한 것과 같이 동기 주기를 늘릴수록 에너지 소모량은 줄어들게 된다. 이를 위해서 우리는 동기 주기가 길어지면 그에 따라 증가하게 되는 동기 에러를 보상하기 위해서 마진을 계산하여야 한다. 고정 주기를 갖는 동기 프로토콜들은 마진 크기를 매우 쉽게 추정할 수 있지만, 하이브리드 방식의 경우 동기 주기가 고정되지 않고 다양하기 때문에 마진 크기 추정 역시 매우 복잡하게 된다.

기존 동기 연구에 따르면 동기 주기(\approx 동기 간격, Δt)와 최대 에러의 크기는 $\epsilon_{\max}(\Delta t) = \omega_1 \Delta t + \omega_0$ (단 ω_1 과 ω_0 는 상수)처럼 선형적으로 근사할 수 있다⁹⁾. 만일 센서 노드가 ω_1 과 ω_0 에 대한 정보가 전혀 없는 초기 상황에서는 정확한 ω_1 과 ω_0 를 추정하기 위해서 많은 수의 ($\Delta t_i, \epsilon_i$)에 대한 값이 필요하게 된다. 이 방법은 매우 작은 메모리를 탑재하고 있는 저가의 센서 노드에서는 구현이 불가능하다.

이 문제를 해결하기 위해서 제안 프로토콜은 회귀적 추정과 선형 마진 추정 기법을 동시에 사용한다. 선형 마진 추정의 장점 중 하나는 특정 동기 주기에 대한 데이터가 전혀 없는 상황에서도 추정이 가능하다는 점이다. 이는 최대 에러와 동기 주기에 대한 전체적인 경향을 우선 파악하고 이를 토대로 추정을 수행하기 때문에 가능하게 된다.

기존 연구에서 제안된 회귀적 추정은 식 (7)에서 보면 알 수 있듯이 최대 오차의 크기와 동기 주기에 대한 관계를 찾는데 재사용할 수 있다¹¹⁾.

$$\begin{aligned} & \arg \min_{\omega_1, \omega_0} \left\{ \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} (\Delta t_i - \Delta t_i')^2 \right\} \\ & = \arg \min_{\omega_1, \omega_0} \left\{ \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} (\Delta t_i - \omega_1 \Delta \tau_i - \omega_0)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

최대 에러 크기에 대해서만 고려를 하기 때문에, (7)은 추정된 에러 크기보다 큰 새로운 에러 ϵ_n 이 발생했을 때만 새 입력이 주어진다. 이를 통해 시간이 흐를수록 (7)의 결과는 동기 주기별 최대 에러 크기에 근접하게 된다.

δ_{α}^+ 와 δ_{α}^- 는 각각 α 의 증가와 감소 속도를 조절하기 위한 파라미터로 일반적으로 1과 0.2로 설정된다. 초기 마진에 대한 크기가 수렴하지 않은 상태에서 추정 실패에 대한 에러를 줄이기 위해 현재 얻은 마진보다 좀 더 큰 마진을 얻기 위해 사용된다.

Algorithm 2 마진 크기 추정.

```

1 :  $\alpha = \alpha_{init}, n = 1$ 
2 : loop
3 :   if  $m_n = \alpha(\omega_1 \Delta t_n + \omega_0) < \epsilon_n$ 
4 :     /* estimation failed */
5 :      $\alpha \leftarrow \alpha(1 + \delta_{\alpha}^+)$ 
6 :   else
7 :     if  $\omega_1 \Delta t_n + \omega_0 < \epsilon_n$ 
8 :       if fixed inter-packet time case
9 :          $\omega_1 \leftarrow \epsilon_n / \Delta t_n$ 
10 :         $\omega_0 \leftarrow 0$ 
11 :       else
12 :         Find  $\omega_1$  and  $\omega_0$  from (6).
13 :       end if
14 :     else
15 :        $\alpha \leftarrow \max\{\alpha(1 - \delta_{\alpha}^-), \alpha_{min}\}$ 
16 :     end if
17 :   end if
18 :    $n \leftarrow n + 1$ 
19 : end loop
    
```

IV. 성능 평가

4.1 실험 환경 및 비교 프로토콜

제안된 프로토콜의 성능 평가 방법에 대해 설명하고 그에 따른 성능 평가 결과를 분석하기로 한다. 성능을 평가하기 위해서 우리는 TelosB 노드^[11]와 TinyOS^[12]를 이용하여 총 4가지 종류의 MAC 프로토콜을 구현하였다. 매 실험마다 10시간 마다 노드의 소모된 평균 에너지의 양을 측정하였으며, 100시간 동안 동일 외부 환경에서 총 6쌍의 송수신 노드를 가지고 실험하였다. 다른 비교 프로토콜 및 설정은 다음과 같다.

4.1.1 SCP-MAC

SCP-MAC은 동기 에러에 대한 마진을 추정하기 위해 최대 클럭 편차율을 이용하는 대표적인 MAC 프로토콜이다. 마진 사이즈 $m(\Delta t)$ 는 식 (2)와 같이 $2\alpha \Delta t$ 로 주어진다. 일반적으로 최대 클럭 편차율 θ 는 30ppm (Part Per Million)으로 주어지며, 추가로 다른 편차율에 대한 성능 영향을 알아보기 위해 0.1 θ 즉 3ppm에 대해서도 비교하기로 한다. 이 프로토콜은 편의상 SCP-MAC(0.1)로 표현하기로 한다.

4.1.2 동적 마진 기반 SCP-MAC

최대 클럭 편차에 비례하는 마진 대신, 실측된 동기

오차를 기반으로 마진을 구하는 경우의 성능을 알아보기 위해 기존 SCP-MAC을 수정하여 성능을 비교하였다.

이 프로토콜은 고정 주기에 대한 마진 추정은 간단하다는 것을 이용하여 동적 마진 기반 SCP-MAC 프로토콜은 비주기적 마진 추정을 지원하기 위해서 여러 개의 고정 마진을 이용한다. 즉 전체 주기 영역은 k 개의 서브 영역으로 나뉘게 되고 각 서브 영역에 대해서 고정 주기 추정 알고리즘이 사용된다. i 번째 서브 영역은 $(\Delta t_0 \beta^i, \Delta t_0 \beta^{i+1})$, 단 $\beta > 1$ 으로 주어지며, 이때 마진 크기는 $a \epsilon_{\max}^i$ 로 주어진다. 여기서 ϵ_{\max} 는 지금까지 얻은 에러 중 가장 큰 값이며, a 는 safety factor이다. 작은 β 값과 충분히 많은 입력 값들이 있는 경우 가장 정확한 마진 추정이 가능하다. 편의상 SCP-MAC(DYN)으로 표현하기로 한다.

각 프로토콜 별 주요 파라미터 설정값은 표 1과 같다.

표 1. 프로토콜별 파라미터 설정
Table 1. Parameter configuration for each protocol

Name	Parameters
Proposed	$\mu=0.9$
SCP-MAC	$\epsilon=30\text{ppm}$
SCP-MAC(0.1)	$\epsilon=3\text{ppm}$
SCP-MAC(DYN)	$\beta=2, \alpha=2, \Delta t_0=2\text{초}$

4.2 평가 결과

패킷 전송 주기를 1분과 1시간으로 설정한 후 각 프로토콜별 에너지 소모량, 추정 성공률, 메모리 사용량을 각각 측정한 결과는 다음과 같다.

4.2.1 에너지 소모량

프로토콜 간 성능 비교를 용이하게 하기 위해서 가장 높은 에너지 소모량을 나타낸 SCP-MAC를 기준으로 각 프로토콜 별 에너지 소모량의 비율을 사용하기로 한다. 그림 2, 3은 패킷 전송 간격에 따라 그 비율을 나타낸 것이다.

패킷 전송 간격에 상관없이 SCP-MAC(0.1)은 SCP-MAC에 비해 10배 작은 마진을 사용하면서 거의 90% 적게 에너지를 소모하는 것으로 나타났다.

SCP-MAC(동적마진)의 경우 마진 크기가 기존 방식에 비해 작지만 시간에 지남에 따라 크기가 증가하여 에너지 소모량을 최소화하지 못함을 알 수 있다.

반면 제안 프로토콜은 패킷 전송 간격이 1시간일 때에는 SCP-MAC(동적 마진) 대비 33% 적게 에너지를 사용하였다. 패킷이 일정한 간격으로 전송되는 경

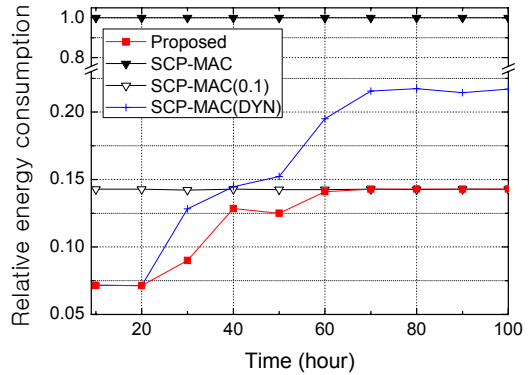


그림 2. 패킷 전송 간격이 1분인 경우 프로토콜별 상대적인 에너지 소모량
Fig. 2. Relative energy consumption for each protocol where packet transmission interval is 1min.

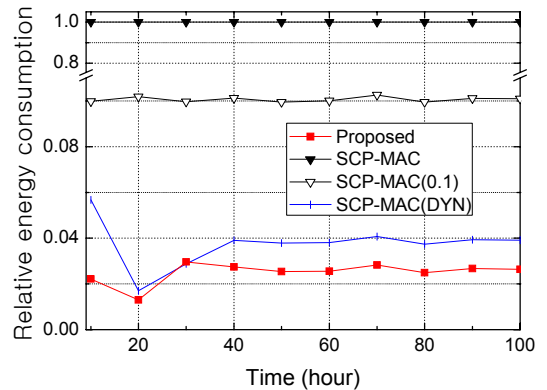


그림 3. 패킷 전송 간격이 1시간인 경우 프로토콜별 상대적인 에너지 소모량
Fig. 3. Relative energy consumption for each protocol where packet transmission interval is 1hour.

우 제안 방식의 마진은 과거에 얻은 추정 에러 값들에 대한 exponentially weighted 평균값에 비례하게 된다. 따라서 충분한 양의 $(\Delta t_n, \epsilon_n)$ 데이터가 존재할 경우 상당히 정확하게 wakeup 시간을 추정하고 있다고 말할 수 있다.

그림 4는 패킷 전송 간격을 1분에서 1시간으로 늘림으로써 에너지 소모량을 얼마나 감소시킬 수 있는지를 나타낸 것이다. 제안 방식의 경우, 각 환경에서 에너지 소모량을 크게 줄이면서 동시에 전송 주기에 비례하여 에너지 소모량 향상 비율이 가장 높음을 알 수 있다. 따라서 제안 방식은 일반적인 환경 뿐만 아니라 충격계수가 매우 낮은 환경에서도 적합한 것을 알 수 있다.

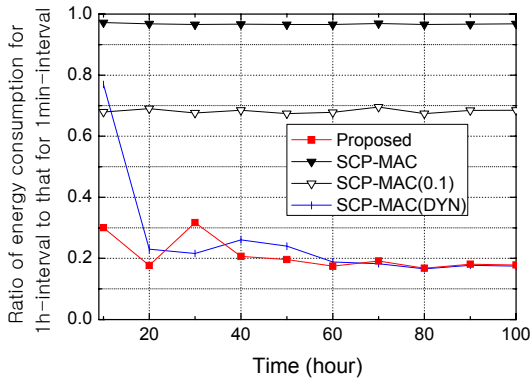


그림 4. 패킷 전송 간격이 1분일 때와 1시간일 때 에너지 소모량의 비율.

Fig. 4. A ratio of the total energy consumptions for each protocol where the transmission interval is 1min to that where interval is 1hour.

4.2.2 메모리 사용량

각 프로토콜 별 메모리 사용량은 표2와 같다. 제안 방식은 최대 클럭 편차 기반 방식보다 높지만 동적 마진을 사용하는 경우에 비해서는 매우 적은 메모리를 사용하는 것을 알 수 있다.

반면 최대 클럭 편차율을 사용하는 SCP-MAC이 가장 작은 메모리 사용량을 갖는다. 적응적으로 마진을 추정하지 않기 때문에 알고리즘이 간단하고 메모리 사용량이 적게 된다.

하지만 제안 방식 역시 사용량이 노드당 20 바이트 이하이므로 SCP-MAC(동적마진)을 제외한 프로토콜들은 메모리 사용량의 측면에서 일반 무선 센서 노드에 적용하는데 제약이 되지 않는다고 말할 수 있다.

표 2. 메모리 사용량 비교
Table 2. Memory requirement comparison result

Name	Word count
Proposed	6
SCP-MAC	1
SCP-MAC(0.1)	1
SCP-MAC(DYN)	39

4.2.3 추정 성공률

실험에 사용된 모든 프로토콜들은 추정을 위한 값들을 학습하기 위한 과정에서 0.1 % 보다 낮은 추정 실패를 하였으며, 이후에는 모두 실패 없이 항상 성공하였다. 따라서 실제 환경에서 적용하기에 동기 성능은 모두 뛰어나다고 하겠다.

V. 결 론

무선 모니터링은 무선 센서 네트워크에서 가장 중요한 응용 분야 중 하나이다. 하지만 기존 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜들은 이들 분야에서 요구하는 에너지 조건을 만족하지 못한다. 본 논문에서는 많은 실험을 통해 클럭 편차 특성을 분석하고 이를 토대로 새로운 프로토콜을 제안하였다. 제안 방식은 두 가지 추정 알고리즘을 사용하여 수신 노드의 wakeup 시간과 추정 에러의 크기를 예측한다. 이를 통해서 매우 적은 에너지를 소모하면서 통신을 할 수 있다는 장점이 있다.

실험 결과를 통해 제안 방식이 다른 프로토콜 대비 90% 정도 에너지 소모량을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 성능 저하 없이 매우 넓은 범위의 충격 계수 (duty cycle)를 지원할 수 있음도 확인할 수 있었다.

다만 기존 SCP-MAC과 비교시 사용하는 메모리 양이 많아 메모리가 매우 적고 에너지 소모량이 중요하지 않은 센서 네트워크에는 적합하지 않을 수 있다. 따라서 제안 방식은 매우 긴 네트워크 수명을 필요로 하며 지원 조건이 강하지 않은 무선 모니터링 분야 등에 사용될 것으로 기대한다.

References

- [1] H. S. W. So, G. Nguyen, and J. Walrand, "Practical synchronization techniques for multi-channel MAC," in *Proc. ACM Int. Conf. Mobile Comput. Netw.*, pp. 134-145, 2006.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 12, no. 3, pp. 493-506, Jun. 2004.
- [3] S. Liu, K.-W. Fan, and P. Sinha, "CMAC: An energy efficient MAC layer protocol using convergent packet forwarding for wireless sensor networks," *ACM Trans. Sensor Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 1-34, Nov. 2009.
- [4] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in *Proc. ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.(Sensys)*, pp. 307-320, Nov.

2006.

- [5] Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, "RI-MAC: A receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," in *Proc. ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (Sensys)*, pp. 1-14, Nov. 2008.
- [6] W. Silva, F. Ye, and J. Heidemann, "Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling," in *Proc. ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (Sensys)*, pp. 323-331, Nov. 2006.
- [7] A. El-Hoiydi and J. D. Decotignie, "WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks," in *Proc. ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (Sensys)*, pp. 675-690, Nov. 2003.
- [8] "C-MAC MicroTechnology.HC49/4H SMX crystals datasheet," Sept. 2004 from http://www.cmac.com/mt/databook/crystals/smd/hc494h_smx.x.eps
- [9] K. Römer, P. Blum, and L. Meier, "Time synchronization and calibration in wireless sensor networks," in *Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures*, I. Stojmenovic, Ed. John Wiley & Sons, pp. 199-237, Sept. 2005.
- [10] W. Pak and S. Bahk from "Guidelines for energy efficient protocol design based on Clock Drift Measurement in Wireless Sensor Networks, <http://netlab.snu.ac.kr/~wgpak/doc/technote.pdf>," 2010.
- [11] TelosB, from <http://www.xbow.com/Products/Productpdf/Wirelesspdf/TelosBDatasheet.eps>
- [12] TinyOS Forum, from <http://www.tinyos.net>. Aug. 10, 2010 DRAFT
- [13] K. -W. Choi, W. Pak, and Y. -J. Choi, "Geolocation channel-setup protocol for cognitive radio in tactical trunk systems," *J. KICS*, vol. 35, no. 10. pp. 1504-1511, 2010.

박 우 길 (Wooguil Pak)



2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 졸업
 2002년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
 2009년 1월 : 삼성시큐아이 연구소 과장
 2009년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2010년 2월~2013년 2월 : 아주대학교 장위 국방 연구소 연구교수
 2013년 3월~현재 : 계명대학교 컴퓨터공학과 조교수 <관심분야> 사물지능통신, 네트워크 시스템 보안