

# IEEE 802.15.4 MAC/PHY를 이용한 TDMA 기반 Superframe 네트워크 구현

오석호, 김강묘, 정하연, 김기형, 유승화  
아주대학교 일반대학원

e-mail:{tadybear, rlaay, jhayeon, kkim86, swyoo}@ajou.ac.kr

## Implementation of TDMA based superframe network using IEEE 802.15.4 MAC/PHY

SukHo, Oh, Kang-Myo Kim, Hayeon Jung, Ki-Hyung Kim, Seung-Wha Yoo  
Ajou Univ.

### 요 약

산업장 기반 모니터링 시스템에 무선 네트워크 기술의 도입은 시스템 도입 및 유지보수에 있어 반드시 필요하다. 무선 네트워크 기반의 산업장 모니터링을 위해 현재 USN 네트워크에서 광범위하게 사용되고 있는 IEEE 802.15.4 하드웨어 및 MAC 을 이용하여 Frequency Hopping을 수행하는 Superframe 기반의 TDMA 기술을 구현하였다.

### 1. 서론

현재 국내외의 중소기업 및 대기업 등의 많은 산업장에서 장비 및 시설물에 대한 모니터링 시스템을 도입하고 있다. 산업장 기반의 모니터링 시스템에서는 데이터 전송의 신뢰성이 중요하다. 이를 위해 기존에 구축된 시스템들은 유선 네트워크에 기반하여 구축되게 된다. 하지만, 유선 네트워크 기반의 시스템은 시스템 도입 및 산업장 시설 변경 및 증축에 있어 많은 시간과 높은 추가비용을 요구한다.

무선 네트워크 기반의 모니터링 시스템은 네트워크 설치 및 유지보수 과정에서 드는 시간 및 비용이 기존의 유선 시스템에 비해 매우 낮은 장점을 가지고 있다. 하지만, 기존의 무선 네트워크 기반 모니터링 시스템은 데이터 전송의 신뢰성을 제공하지 않기 때문에 산업장의 모니터링 시스템으로는 맞지 않다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 산업장 기반 모니터링 시스템의 네트워크 기술 개발은 필수적이라 할 수 있다.

본 논문은 산업장 기반 무선 모니터링 시스템과 관련하여 IEEE 802.15.4 PHY/MAC을 이용한 TDMA 기반 네트워크 기술을 소개한다. 그리고 해당 기술의 개발 및 구현을 다룬다.

### 2. 본론

#### 2.1 문제점 및 해결방안

현재 모니터링 시스템에 사용되고 있는 기술 또는 사용 가능한 기술에는 Zigbee등의 USN 기술이 있다. 기존 USN 기술을 이용한 공장 모니터링 시스템의 구현에서 가

장 큰 문제점은 신뢰성 보장에 제약을 가진다는 점이다. 와이파이 및 다양한 무선 장치들과 장애물 등으로 인한 주파수 간섭이 많은 상황에서 기존의 USN 장치들은 무선 간섭을 받아 데이터 전송의 실패가 빈번하게 발생한다.

이를 해결하기 위해, Frequency Hopping 기술이 필요하다. Frequency Hopping 기술이란 통신에 사용하는 주파수를 지속적으로 변경하며 네트워크를 운용하는 것을 뜻한다. Frequency Hopping 기술을 이용하면 사용 가능한 주파수 대역 내에서 통신에 사용하는 주파수를 변경하며 통신을 수행하기 때문에, 특정 주파수 대역에 주파수 간섭이 발생하더라도 다른 주파수를 이용하여 성공적인 데이터 전송을 수행할 수 있다. Frequency Hopping을 수행하기 위해서는 다음과 같은 정보가 필요하다.

- Frequency Hopping Pattern
- Frequency Hopping Timing

네트워크에 참여한 장치들의 주파수가 Frequency Hopping Pattern을 따라 지속적으로 변할 때, 데이터 송/수신을 하는 대상 장치들은 동일한 Frequency를 사용해야 한다. 또한 데이터를 전송하고, 수신하는 시점이 맞아야 성공적인 데이터 전송을 수행할 수 있다. 이를 위해 TDMA(Time Division Multiple Access)방식의 접근이 필요하다.

TDMA 기법을 Frequency Hopping 기술이 적용된 USN에 도입하여 데이터 송/수신을 수행하는 대상 장치 사이의 주파수 및 시간 동기화를 수행한다. 또한, 모니터링 시스템에서 TDMA 기법의 도입은 주기적인 데이터 전송이

필요한 상황에서 데이터 전송의 QoS(Quality of Service)를 제공한다. TDMA 방식의 네트워크를 구성하기 위해서는 다음과 같은 정보가 필요하다.

- Timeslot의 길이
- 각 Timeslot에서의 장치의 동작 정의

Timeslot은 TDMA에서 동기화를 수행하는 단위로서 일정한 시간 간격을 가지고 반복되게 된다. 1개의 Timeslot에서는 1개의 MAC Payload가 전송된다. 1개의 Timeslot 내에서 데이터의 전송 및 Ack의 전송까지 이루어진다.

본 논문에서는 각 Timeslot에서의 장치의 동작이 정의된 자료구조를 Superframe이라 명명한다. Superframe은 Timeslot의 모음이며, Timeslot 내에서 장치들의 데이터 전송 동작(Tx/Rx/Idle)이 정의되어 있다. Superframe은 주기적으로 반복된다.

각 장치들은 동기화된 시간을 통해 현재 Timeslot이 네트워크 시작으로부터 몇 번째인지 계산할 수 있다. 해당 정보와 Frequency Hopping Pattern, Superframe 정보를 이용하여 현재 Timeslot에서 사용할 channel과 데이터 전송 동작을 결정한다.

본 논문에서는 네트워크의 시간 동기화와 관련된 내용과 네트워크 노드간의 Superframe 및 Link 정보, Frequency Hopping Table등의 정보를 전달하는 과정은 다루지 않는다.

## 2.2 구현

본 네트워크 기술은 기존 USN 네트워크에서 많이 사용하는 IEEE 802.15.4 하드웨어 및 MAC을 이용하여 구현하였다. IEEE 802.15.4 MAC에서 정의하는 Device 중 RFD(reduced-function device)만을 이용하여 Scan, Association 등의 기능은 이용하지 않고 오로지 데이터의 Tx 및 Rx 기능만을 사용한다. IEEE 802.15.4 MAC 계층 위에 Timeslot, Superframe 등의 기능을 구현하여 신뢰성이 향상된 네트워크 기능을 제공한다.

### 2.2.1 구현 시스템

MCU: MSP430F2618

RF: CC2520

TI MAC

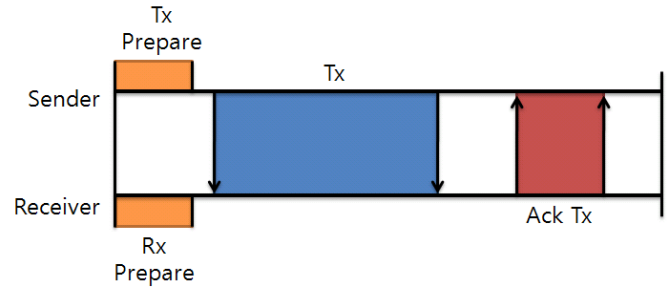
IAR Compiler

### 2.2.2 Timeslot

Timeslot은 TDMA 방식 통신의 기본이 되는 통신 단위이다. Timeslot의 길이는 일정한 길이로 고정되어 있으며, 네트워크가 운용되는 동안 같은 길이로 반복되게 된다. 1개의 Timeslot 내에서는 1개의 MAC Payload 전송과 해당 Payload에 대한 Ack의 전송이 이루어진다.

[그림 1]은 Timeslot 구조를 나타내고 있다. Timeslot의

시작부분에서 데이터 송/수신을 위한 준비를 한다. 준비동작이 끝난 후 데이터 전송이 수행되고, 데이터 전송이 끝난 후 Ack가 전송된다.



[그림 1] Timeslot 구조

### 2.2.3 Superframe

본 구현에서의 Superframe은 네트워크 전체적인 통신 스케줄을 담당하고 있다. Superframe은 여러 개의 Timeslot으로 이루어져 있다. [그림 2]는 Superframe 구조를 나타내고 있다.

Timeslot 1	Timeslot 2	...	Timeslot N
A->B	B->C		C->B

[그림 2] Superframe Structure

Superframe에서 각각의 Timeslot에는 해당 구간에서 수행할 수 있는 데이터 전송이 정의되어 있다. [그림 2]의 Timeslot 1 구간에서는 A에서 B로의 데이터 전송이 수행되고, Timeslot 2에서는 B에서 C로의 데이터 전송이 수행된다. A->B, B->C와 같이 Superframe의 각 Timeslot에서 특정한 두 단말 사이에 수행되는 데이터 전송을 Link라고 한다.

Superframe은 고정된 크기를 가지며, 네트워크가 운용되는 기간 동안 계속 반복된다. [그림 3]은 네트워크 운용과정에서 동일한 Superframe이 주기적으로 반복되는 것을 표현하고 있다.



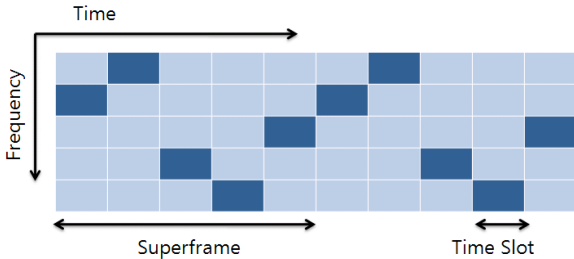
[그림 3] Superframe 운용

### 2.2.4 Frequency Hopping

주파수 변경과정을 패턴화 하여, 네트워크에 참여하는 모든 노드들의 주파수 동기화를 보장한다. Frequency Hopping 기능을 위해 Frequency Hopping Pattern 정보가

필요하다. Frequency Hopping Pattern은 Superframe과 마찬가지로 일정한 크기를 갖고, 네트워크가 운용되는 동안 계속 반복된다.

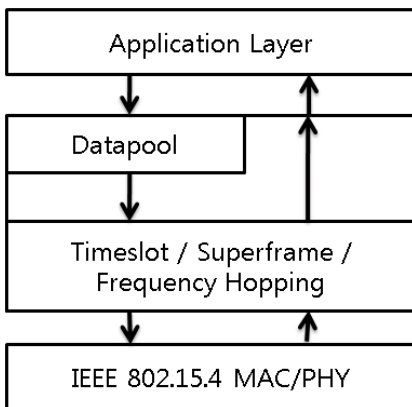
[그림 4]는 Superframe, Frequency, Timeslot 사이의 상관관계를 표현하고 있다.



[그림 4] Frequency, Timeslot, Superframe 관계

### 2.2.5 Datapool

응용 프로그램에서 다른 노드에게 전송할 데이터가 발생하면, 해당 데이터를 Datapool에 저장하게 된다. 노드는 Timeslot이 시작하는 시점에 Link 정보를 확인, 데이터 송/수신의 대상을 알 수 있다. 노드는 현재 Timeslot에서의 동작이 Tx일 경우, Link 정보의 수신 대상을 확인하여 Datapool에서 전송해야 할 데이터를 찾아 수신 상대에게 전송하게 된다. [그림 5]는 데이터 송/수신 과정에서 데이터 흐름을 표현하고 있다.



[그림 5] 프로그램 구조 및 데이터 흐름

데이터의 송신이 완료된 뒤, Ack 정보를 수신한 후에 정상적으로 데이터 전송이 끝나게 되면 Datapool에서 송신한 데이터의 정보를 삭제한다. 만약, Ack가 손실되거나 전송 중 오류가 발생하게 되면, 다음 전송가능 구간에서 재전송을 수행한다.

### 2.2.6 Link, Frequency의 결정 및 Advertisement

노드는 Timeslot이 시작하는 시점에 현재 slot에서 사용

해야 할 Link 정보와 Frequency 정보를 찾는다. 이를 이용하여 현재 slot에서 수행해야 할 동작과 사용할 Frequency를 선택하게 된다.

네트워크 운행 시간 정보를 이용, 현재 slot이 몇 번째인지 구할 수 있다. 이 정보를 이용하여 Superframe과 Frequency Hopping Pattern을 참조, Link 정보와 Frequency 정보를 구한다.

```

Superframe[Superframe_Size]; //Superframe 구조
FrequencyPattern[Frequency_Size]; //Frequency
//Hopping Pattern
TimeslotLen; // Timeslot의 길이
CurrentTime; // 네트워크 현재 시간

Timeslot_Num = CurrentTime / TimeslotLen;

CurrentLink =
    Superframe[Timeslot_Num/Superframe_Size].Link;
CurrentFrequency =
    FrequencyPattern[Timeslot_Num/Frequency_Size];
    
```

[표 1] Link 정보와 Frequency 정보 결정

새로운 노드가 네트워크에 참여하기 위해서는, 네트워크에 참여하고 있는 기존 노드들과 시간 및 주파수 동기를 맞춰야 한다. 새로운 노드의 참여를 위해 기존 네트워크의 특정 노드들은 Advertisement 동작을 수행한다.

Advertisement 동작을 수행하는 노드들은 네트워크에 새로운 노드가 참여하는데 반드시 필요한 정보를 담은 Advertisement 패킷을 주기적으로 전송한다. Advertisement 패킷은 다음과 같은 정보들로 구성된다.

- 네트워크 운행 시간
- 현재 Timeslot 번호

네트워크에 참여하는 새로운 노드는 Advertisement 동작을 수행하는 노드가 전송하는 Advertisement 정보를 수신하기 위해 Rx 동작을 반복 수행한다. Advertisement 정보를 수신한 노드는 해당 정보를 이용하여 다음 slot에서 사용할 Link 정보와 Frequency 정보를 구할 수 있다. 해당 정보를 수신한 장치는 다음 Timeslot의 시작시간을 추정, 기존에 동작하고 있는 노드들과 시간 동기화를 수행한다.

### 2.2.7 동작

Timeslot은 일정한 주기로 계속 반복된다. Timeslot의 운용은 타이머를 이용, Timeslot의 시간 단위로 타이머 인터럽트를 발생한다. 타이머 인터럽트가 발생하면, 타이머 인터럽트 핸들러에서 Timeslot\_Prepate 함수를 호출한다.

Timeslot\_Prepate 함수에서는 현재 slot에서의 사용 주파

수 및 수행해야 할 동작을 결정한다. [표 1]에서 표현하는 과정을 통해 현재 네트워크 시간과 Timeslot의 길이를 이용하여 Timeslot 번호를 구하고, 이를 이용하여 Superframe 구조와 Frequency Hopping Pattern 구조를 참조하여 현재 slot에서 사용할 주파수와 Link 정보를 결정한다.

Link 정보에는 해당 slot에서 수행해야 할 동작을 정의하고 있다. 수행해야 할 동작은 다음과 같다.

- Tx

현재 slot의 동작이 Tx일 경우, 해당 Link의 목적지와 알맞은 데이터를 Datapool에서 검색하고 Frequency 변경 및 데이터 송신, Ack 정보 수신 동작을 수행한다.

- Rx

현재 slot의 동작이 Rx일 경우, Frequency 변경 및 데이터 수신 준비를 한다. Rx Timeout 시간동안 데이터 수신이 이루어 지지 않을 경우, 다음 slot 시작 시간으로 타이머를 설정하고 현재 slot의 동작을 종료한다. Rx Timeout 시간 내에 데이터가 수신된 경우, 해당 데이터의 검증작업 및 데이터 송신측에 Ack 정보를 송신한다.

- Idle

현재 slot의 동작이 idle일 경우, 다음 slot의 시작 시간까지 타이머를 설정한 후, 현재 slot의 동작을 종료하게 된다.

Timeslot\_Prepere 함수의 상세 동작은 다음과 같다.

```
// Timeslot 시작
CurrentLink = GetCurrentLink();
CurrentFrequency = GetCurrentFrequency();

if(CurrentLink.Rule == Tx) {
    ChangeFrequency(CurrentFrequency);
    Data = GetDataFromPool(CurrentLink.Dest);
    MAC_TxData(Data);
    SettingTimer(RxAck_Timeout);
    MAC_RxEnable();
}
if(CurrentLink.Rule == Rx) {
    ChangeFrequency(CurrentFrequency);
    SettingTimer(Rx_Timeout);
    MAC_RxEnable();
}
if(CurrentLink.Rule == Idle) {
    SettingTimer(NextTimeslot);
}
```

[표 2] Timeslot\_Prepere 동작

#### 4. 결론

산업장 기반 모니터링 시스템에 무선 네트워크 기술의 도입은 시스템 도입 및 유지보수에 있어 반드시 필요하다. 하지만, 무선 네트워크의 특성상 신뢰성 보장이 문제점이 되어 산업장의 기반 네트워크로서 사용되지 못하였다.

무선 네트워크 기반의 산업장 모니터링을 위하여 신뢰성을 보장할 수 있는 기술을 USN 기술과 접목시켰다. 현재 USN 네트워크에서 광범위하게 사용되고 있는 IEEE 802.15.4 하드웨어 및 MAC 을 이용하여 Freequency Hopping을 수행하는 Superframe 기반의 TDMA 기술을 구현하였다.

이를 통해 기존 유선 네트워크에 비해 설치 및 유지보수가 용의하고 기존 USN 네트워크보다 신뢰성을 향상시킨 무선 네트워크를 구축할 수 있을 것이라 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] ISA-100.11a-2009 Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications, 2009.
- [2] 802.15.4-2006, IEEE Standard., "Wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks.", Sep. 2006.
- [3] IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals, RFC 4919, 2007.
- [4] Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, 2007.

This work (Grants No.00035521) was supported by Business for Cooperative R&D between Industry, Academy, and Research Institute funded Korea Small and Medium Business Administration in 2010

"본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 "IT융합 고급인력과정 지원사업"의 연구결과로 수행되었음" (NIPA-2010-0004)