

IEEE 802.15.4의 Inter-PAN 통신을 위한

비콘 충돌 회피 기법

이우준^o 이혁준, 박인, 심응보

광운대학교 컴퓨터 공학과

{woojune^o, hlee, inpark, djwrckx}@kw.ac.kr

Beacon Collision Avoidance Mechanism

for IEEE 802.15.4 Inter-PAN Communication

Woojune Lee^o Hyukjoon Lee, In Park, Eungbo Shim
Dept. of Computer Engineering, Kwangwoon University

요 약

IEEE 802.15.4는 저전력 무선 개인 네트워크 기술의 표준으로서 USN(ubiquitous sensor network)의 핵심 무선 통신 기술로 각광을 받고 있다. 그러나 IEEE 802.15.4는 제한된 RF 전송범위와 스타 토폴로지를 기반으로 하는 통신 기법만을 제공하고 있으며, 인접한 PAN 간(inter-PAN)의 통신 기술은 정의되어 있지 않다. 이러한 기술상의 제약으로 IEEE 802.15.4는 통신 영역이 매우 제한적이며, 이에 따라 통신시 음영지역이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 현재까지 통신영역 확장을 위한 주요 기술적 사항인 효율적인 토폴로지 형성방법, 주소할당 및 라우팅 방법, 인접 네트워크 간의 비콘 충돌 회피 기법 등에 대한 활발한 연구가 진행되어 왔다. 이중 인접한 네트워크간의 비콘 충돌 방지 기법은 IEEE 802.15.4의 네트워크가 비콘에 의해서 관리된다는 점을 고려하였을 때 데이터 전송 및 네트워크 유지를 위해 우선적으로 해결되어야 할 사항이다. 본 연구에서는 제한된 비콘 충돌 회피 기법을 분석하고, 이중 비활성 구간(inactive portion)을 활용한 기법에 대한 구체적인 구현 방안을 제시 하였다. 또한 상용 임베디드 장치인 Nano-24에 설계한 비콘 충돌 회피 기법을 구현하여 동작을 검증, 분석하였다.

1. 서 론

IEEE 802.15.4[1]는 저전력을 지향하는 초소형 기기 간의 무선 네트워크를 위한 MAC/PHY 계층 표준이다. IEEE 802.15.4의 가장 큰 특징은 PAN을 구성하는 모든 단말 장치가 PAN 코디네이터(coordinator)가 송신하는 비콘 프레임에 동기화 되어 RF 송수신기의 전원을 켜고, 끄는 동작을 수행하는 것이다. PAN의 초기 설정시 비콘 프레임으로 단말장치 RF 송수신기의 duty cycle을 조정함으로써 저전력 장치 기반의 무선 개인 네트워크(Wireless Personal Area Network; WPAN)의 구성이 가능해 진다. 이러한 저전력 특징과 지속적인 RF 장치의 가격 하락으로 IEEE 802.15.4 기술은 다양한 분야의 활용이 예상되며 특히 미래의 USN 환경 구축의 핵심 기술로 자리잡고 있다.

그러나 IEEE 802.15.4가 저속 무선 개인네트워크를 위한 기술의 표준이기 때문에 통신영역을 확장하여 다양한 분야에 활용하기 위해서는 많은 기술적인 문제점을 해결해야 한다. IEEE 802.15.4는 네트워크 구성시 PAN 코디네이터를 중심으로 하는 스타 토폴로지에 대한 기술만이 정의되어 있다. 이러한 기술상의 제약은 통신영역의 제한과 그에 따른 음영지역 발생의 문제점을 야기한다. 인접한 PAN 상호간의 데이터 전송을 통한 통신 영역의 확장시 인접한 PAN에서 사용되는 비콘 프레임의

충돌 회피 기법은 멀티홉 네트워크 구성의 핵심 요소이다. 이러한 이유로 현재 ZigBee, IEEE 802.15.4b, IEEE 802.15.5 그룹의 표준화 과정에서는 비콘 충돌 회피 기법을 반드시 포함해야 할 요소 기술로 인식하고 이에 대한 연구를 진행하고 있다.

본 연구에서는 제안된 비콘 충돌 회피 기법들의 장단점을 분석하고, 그중 ZigBee에서 제안된 비활성 구간을 활용한 기법[2]에 대한 구체적인 기술적 정의와 구현 방안을 제시 하였다. 또한 이를 상용 임베디드 장치인 Nano-24에 구현하여 동작을 검증, 분석하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 IEEE 802.15.4의 채널 관리 기법인 슈퍼프레임 구조에 대하여 설명한다. 3 장에서는 현재 진행되고 있는 비콘 충돌 회피 기법에 관한 연구를 분석한다. 4 장에서는 비활성 구간을 활용한 비콘 충돌 회피 기법을 구현하기 위해 필요한 기술적인 사항을 구체적으로 설계한다. 5장에서는 4장에서 설계된 내용을 상용 임베디드 장치에 구현하여 동작 검증을 하도록 한다. 마지막 6 장에서는 결론 및 향후 계획을 논 의한다.

2. 연구배경

IEEE 802.15.4에서는 CSMA-CA와 time-slot을 점용한 슈퍼프레임 구조[1]를 사용하여 채널 액세스 제어를 한다(그림 1). 슈퍼프레임 구조는 모든 장치가 RF 송수

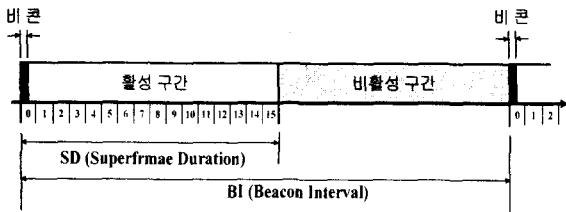


그림 1. IEEE 802.15.4 MAC 슈퍼프레임 구조

신기의 전원을 인가하여 경쟁을 통해 채널에 접근하는 활성 구간과 배터리의 전력 소모 방지를 위해 RF 송수신기의 전원을 차단하는 비활성 구간으로 분리된다. 슈퍼프레임 구조에서 네트워크를 관리하는 코디네이터는 비콘을 주기적으로 전송하며, 주변 기기들이 비콘 신호에 동기를 맞추어 슬롯화 된(slotted) CSMA-CA 방식에 의해 데이터 전송을 시도한다. 슬롯화 된 CSMA-CA 방식은 CCA(Clear Channel Assessment)[1]를 보다 효율적으로 실행함으로써 RF 수신기에 소모되는 배터리의 전력을 최소화한다.

슈퍼프레임의 구조는 코디네이터에 의하여 설정된 *BO*(beacon order)와 *SO*(superframe order)에 의하여 결정된다. *BO*는 코디네이터가 발송하는 비콘의 인터벌을 나타내며, *SO*는 비콘 인터벌 사이에 위치하는 활성 구간의 길이를 나타낸다. *BO*와 *SO*값은 비콘 프레임에 포함되며, 종단장치(end-device)는 연결(association) 동작 수행 시에 수신된 비콘 프레임의 *BO*와 *SO*값으로 코디네이터의 슈퍼프레임 구조와 동일하게 자신의 RF 송수신기의 duty cycle을 조정하게 된다. 슈퍼프레임 정보와 다양한 PAN 관리 정보를 포함하는 비콘은 활성 구간의 CAP(Contention Access Period)[1]에 앞서 코디네이터에 의해서 발송된다. 비콘은 네트워크를 관리하는 핵심 정보를 포함하기 때문에 인접한 PAN간의 비콘 충돌 방지는 통신 영역확장을 위해 해결되어야 할 가장 기본적인 사항이다.

3. 관련 연구

3.1 비활성 구간을 활용한 비콘 충돌 회피 기법

[2]에서는 *ST*(StartTime)를 정의하여 비활성 구간을 활용하는 비콘 충돌 회피 기법이 제안되었다(그림 2). *ST*는 비콘 인터벌 사이에 활성 구간의 시작 위치를 결정하는 변수로서, 부모 PAN의 코디네이터의 경우 0으로

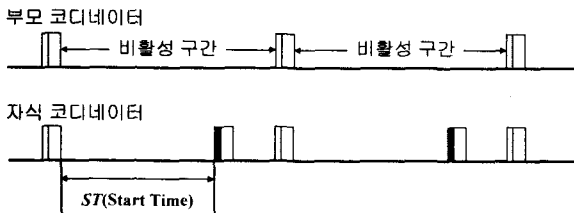


그림 2. 비활성 구간을 활용한 비콘 충돌 회피 기법

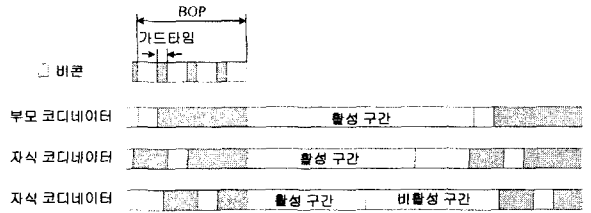


그림 3. Beacon-only Period의 적용

설정되어 기존 슈퍼프레임 구조와 동일하게 동작되고, 자식 PAN의 경우 부모 PAN의 활성 구간의 지속범위와 겹쳐지지 않는 범위 내에서 설정 될 수 있다. 이 방법은 기존 IEEE 802.15.4 MAC 계층에 부분적인 추가사항으로 구현이 가능하다는 점과 숨은 단말 문제(hidden node problem)로부터 자유롭다는 장점을 가진다. 하지만 라우터로 동작하는 자식 PAN의 코디네이터는 부모와 자신의 두 개 이상의 활성 구간에서 동작하므로, 노드간 전력소모의 불균형을 가져 올 수 있다. 또한 PAN간의 활성 구간이 분리되기 때문에 PAN 상호간 데이터 전송 시 delay가 발생된다. 위 기법을 제안한 [2]에서는 *ST*의 정의외에 자세한 기술적 명세는 포함되어 있지 않다.

3.2 BOP를 적용한 비콘 충돌 회피 기법

국내에서는 비콘 충돌 회피 기법 중 슈퍼프레임 구조 내에 비콘만을 전송하는 구간인 BOP(Beacon-only Period)[3]를 정의해 인접한 코디네이터의 비콘 충돌을 해결하는 방법이 IEEE 802.15.4b에 제안 되었다. 그림 3은 BOP가 적용된 슈퍼프레임 구조를 나타낸다. 인접한 코디네이터들은 경쟁에서 자유로운(contention-free) BOP 기간 동안에 비콘 전송을 보장받는다. BOP를 할당하기 위해서 비콘 프레임 내에는 비콘 전송 시작시간(beginning time)과 각 비콘의 길이(length)의 정보가 추가적으로 필요하다. 또한 MAC PIB 내에 *postBeaconDelay*라고 하는 attribute가 추가 되어야 한다. 이웃 코디네이터의 비콘 전송슬롯(BTTS ; BeaconTxTimeSlot) 정보를 유지함과 동시에 자신의 비콘 전송슬롯을 결정하는 알고리즘을 사용함으로써 제한된 BOP내에서 많은 코디네이터가 효율적으로 채널(슬롯)을 획득 할 수 있게 된다.

BOP의 사용으로 인접한 코디네이터는 채널자원의 낭비 없이 비콘 전송이 가능해진다. 또한 각 PAN의 코디네이터는 자신의 활성 구간의 길이를 비콘 인터벌 내에서 자유롭게 조정할 수 있다. 자식 코디네이터나 자식 단말로부터 부모 PAN 코디네이터를 목적지를 하는 데이터가 발생 하였을 때도 CAP에서의 채널 경쟁을 통해서 상대적으로 delay가 적게 데이터 전송이 가능하다. 하지만 인접한 PAN 상호간의 CAP 구간을 공유함으로써 발생하는 숨은 단말 문제를 해결하기 위한 별도의 알고리즘이 필요하다. 또한 BOP를 적용하기 위해서는 슈퍼프레임 구조 수정이 불가피하며, 이에 따라 기존 기기들과의 호환성이 저하 되고 동작의 복잡도가 증가하게 된다.

4. 제안하는 비콘 충돌 회피 기법

본 논문에서는 [2]에서 제안된 방법인 비활성 구간을 활용한 비콘 충돌 회피 기법에 기반하여 이를 구현하기 위해 필요한 기술적인 사항을 구체화한 비콘 충돌 기법을 제안한다. 본 기법은 비활성 구간의 슬롯화 및 가드타임(guard time) 기법의 도입으로 보다 효과적인 비콘 충돌 회피 기법을 정의함으로써 기존 제안과 차별성을 두었다.

4.1 채널 스캐닝을 통한 비콘의 수신

비콘 충돌 회피 기법은 MAC에 정의된 mmeScanRequest 함수를 통해 기존 채널상의 PAN의 코디네이터가 송신하는 비콘을 수집하고, 수집된 비콘 정보에 기반 하여 동작한다. scanDuration은 채널 스캐닝 지속시간으로서, 부모 코디네이터의 비콘 인터벌을 예측하기 어렵기 때문에 비콘 수집 실패 시에 지속시간을 점차 증가 시킨다. 비콘 수집 실패 시에는 인접한 PAN이 존재하지 않으므로 코디네이터는 스스로 루트 코디네이터가 되도록 한다. 채널 스캐닝의 결과로 서로 다른 코디네이터가 송신하는 여러 개의 비콘 프레임이 수신되는 경우에는 전체 네트워크의 구성에 따라 효율적인 부모 코디네이터를 결정하는 별도의 절차가 필요하다. 본 연구에서는 부모로 결정된 코디네이터가 존재한다는 가정 하에 비콘 충돌 회피 기법을 구현하였다. 표 1은 채널 스캐닝 인자의 설정 값을 나타낸다.

4.2 액티브 슬롯을 통한 비활성 구간의 슬롯화

다음으로 비콘 충돌 회피 기법이 동작 할 수 있는 루트 코디네이터의 슈퍼프레임 구조를 정의한다. 이는 SO와 BO 값으로 결정되며, 자식 PAN이 결합되기 위하여 충분한 비활성 구간을 할당하기로 한다. 정의된 슈퍼프레임 구조는 $2^{BO}/2^{SO}$ 의 개수로 슬롯화되며, 이를 액티브 슬롯(Active Slot)이라 정의한다. [2]에서 단순히 ST의 설정을 통하여 활성 구간의 시작시간을 설정하는 것과는 달리 비활성 구간의 슬롯화를 통하여 보다 효과적으로 활성 구간을 분리하도록 한다.

액티브 슬롯이 많아질 경우 다수의 자식 PAN에게 슬롯을 할당 할 수 있지만, 각 코디네이터의 비활성 구간 지속시간이 길어짐에 따라서 실제 데이터 전송 시 발생하는 딜레이가 커지게 된다. 또한 액티브 슬롯이 적을 경우 많은 수의 자식 PAN에게 슬롯을 할당 하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 또한 활성 구간 상호간의 데이터와 비콘의 충돌을 방지하기 위해 1구간의 액티브 슬

표 1. 채널스캐닝 설정 값

인 자	설정 값
BYTE scanType	0x02 = passive scan
DWORD scanChannels	채널 스위칭 프로토콜에서 결정된 채널
UINT8 scanDuration	default 8. 실패 시 2씩 최종 14까지 증가

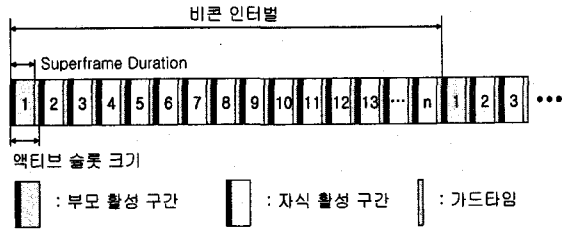


그림 4. 슬롯화된 비활성 구간

롯을 $2^{BO}/2^{SO}-1$ 의 수로 분할하여 가드타임(guard time)을 할당하기로 한다. IEEE 802.15.4 PHY계층에서 제공되는 최대 패킷의 크기는 127byte로, 전송시 4.256ms의 시간이 소요된다[4]. 이는 226 PHY symbol과 같은 시간이며, 위의 계산방법에 의해 가드타임이 226 symbol보다 작게 설정 되었을 경우, 인접한 활성 구간에서의 데이터와 비콘 간의 충돌이 발생할 수 있다. 이 경우 액티브 슬롯 사이에 226 symbol을 할당하는 별도의 계산 방법을 사용하여 연속되는 액티브 슬롯의 데이터 전송과 비콘 간의 충돌을 방지하기로 한다. 그림 4는 액티브 슬롯과 가드타임의 설정을 통해 슬롯화된 비활성 구간을 나타낸다.

4.3 ST의 계산을 통한 액티브 슬롯의 선택

부모의 비콘 프레임의 BO, SO 값과 위에서 정의한 액티브 슬롯기법을 토대로 활성 구간의 시작시간인 ST를 계산할 수 있다. ST의 계산에서 생성된 액티브 슬롯은 랜덤하게 선택하는 방법을 사용한다[5]. 자식 코디네이터로 동작하는 FFD는 부모의 활성 구간에는 RF 수신기를, 자신의 활성 구간에서는 RF 송수신기의 전원을 인가한다. 또한 자신의 활성 구간인 액티브 슬롯에서는 비콘을 전송함으로써 연결된 종단장치를 관리하게 된다. 표 2는 액티브 슬롯과 ST의 계산 과정을 나타낸다.

표 2. 액티브 슬롯과 ST의 계산과정

$$SD = 2^{SO} * aBaseSuperframeDuration$$

$$BI = 2^{BO} * aBaseSuperframeDuration$$

$$aNumActiveSlot = \begin{cases} 2^{BO-SO} & , \frac{SD}{2^{BO-SO}-1} \geq 226 \text{ symbols 일때} \\ \frac{BI}{SD+226 \text{ symbols}} & , \text{otherwise} \end{cases}$$

$$GT = \begin{cases} \frac{SD}{2^{BO-SO}-1} & , \frac{SD}{2^{BO-SO}-1} \geq 226 \text{ symbols 일때} \\ 226 \text{ symbols} & , \text{otherwise} \end{cases}$$

$$ActiveSlotSize = GT + SD$$

$$ST = ActiveSlotSize * \left\{ \frac{rand()}{aNumActiveSlot - 2} + 1 \right\}$$

표 3. 동작검증에 사용된 슈퍼프레임 구조 관련 변수

BO	BI	SO	SD	가드타임	액티브 슬롯 크기
7	122,880 symbols ≈ 1.96s	3	7,680 symbols ≈ 122ms	512 symbols ≈ 8.1ms	8192 symbols ≈ 131ms

5. 상용 임베디드 장치를 통한 동작검증 및 결과분석

본 연구의 시스템 검증에서 사용된 상용 임베디드 장치인 옥타콤의 Nano-24는 ATmega128L (ATmel) 마이크로 컨트롤러와 CC2420(Chipcon) RF 모듈 그리고 SDRAM 및 플래시 메모리로 구성되어 있다. CC2420은 2.4GHz IEEE 802.15.4 규격에서 지원하는 저전력 모드, DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum), 250kbps 데이터 전송속도를 지원하며, IEEE 802.15.4 MAC의 일부 기능을 하드웨어로 탑재하고 있다. 또한 센서 노드의 기능을 위해 별도의 센서보드를 부착, 온도, 조도, 습도, 가스 정보를 수치로 변환이 가능하다.

동작검증에서는 BO:SO를 4:1의 비율로 유지함으로써 부모 PAN의 비콘 주기 사이에 가드타임으로 분리된 15개의 액티브 슬롯을 형성하기로 한다. 표 3은 동작검증에 사용된 슈퍼프레임 구조 관련 변수를 나타낸다.

임베디드 운영체제의 MAC계층 구현부에서 자식 코디네이터(라우터)로 설정된 FFD는 부모의 비콘을 분석하여 계산을 통해 자신의 액티브 슬롯을 선택하도록 하였다. 또한 부모의 활성 구간에서 RF 수신기의 전원을 인가하는 동작과 동시에 ST시간 후의 RF 송수신기의 전원 인가 예약 및 자신의 비콘 송신의 작업을 예약함으로써 비콘 충돌 회피가 이루어지게 하였다.

비콘 충돌 회피 동작을 구현한 2개의 센서노드와 코디네이터로 구성된 2개의 PAN을 구성하였다(그림 5). 각 종단장치의 센서로 부터 수집된 데이터를 루트 코디네이터를 목적지로 릴레이 하는 어플리케이션과 LED를 이용하여 동작을 확인하였다. 약 2초 내에서 2개의 코디네이터의 비콘이 분리된 액티브 슬롯을 선택해 송신됨을 LED와 하이퍼터미널의 출력을 이용하여 확인하였다.

검증에 사용된 슈퍼프레임 구조는 duty cycle이 1/16으로 다소 적은 수인 15개의 액티브 슬롯을 형성한다. 이에 따라 인접한 자식 PAN이 랜덤으로 액티브 슬롯을

선택 할 때, 인접한 PAN과의 충돌 확률이 다소 높다고 볼 수 있다. 어플리케이션의 목적에 따라 많은 차이가 있겠지만 저전력 센서 네트워크에 사용되는 센서노드는 duty cycle이 1% 미만이기 때문에 액티브 슬롯이 중복되어 선택 될 확률은 현저히 낮아진다고 볼 수 있다. 또한 duty cycle이 높아 액티브 슬롯의 충돌이 빈번한 경우에 한해서 액티브 슬롯의 할당 상태를 데이터 프레임을 통해 인접한 코디네이터와 공유하는 방법도 고려할만한 사항이라고 판단된다.

6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 제안된 비콘 충돌 회피 기법들을 분석하고, 그중 ZigBee에서 제안된 비활성 구간을 활용한 기법에 대한 구체적인 기술적 정의와 구현 방안을 제시 하였다. 또한 이를 상용 임베디드 장치인 Nano-24에 구현하여 동작을 검증, 분석하였다. 랜덤으로 액티브 슬롯을 선택하는 방법은 인접한 PAN의 수가 증가 할 때 완벽한 비콘 충돌 회피를 제공하지 못한다. 따라서 어플리케이션의 목적에 따라 BO, SO 값의 선택을 통해 비활성 구간의 지속기간을 탄력적으로 조절하는 방법이 필요하다고 판단된다. 또한 코디네이터 간의 슬롯 할당 정보의 교환을 통한 효과적인 액티브 슬롯의 할당에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 이 외에 확장된 네트워크 구성의 핵심 요소인 효율적인 토폴로지 형성기법과 주소 할당 및 라우팅 기법에 대한 지속적인 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] ANSI/IEEE "Std 802.15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", <http://www.ieee.org>, 2003.
- [2] ZigBee Alliance: "ZigBee Document 053474r06, Version 1.0", <http://www.zigbee.org>, 2005.
- [3] Jun Ho-In, "802.15.5 Mesh Network Standard Trends", In TTA Journal, March 2006.
- [4] Jennic: "Application Note: JN-AN-1035 Calculating 802.15.4 Data Rates", <http://www.jennic.com>, August 2006.
- [5] K. F. Ssu, C. H. Ou, H. C. Jiau, "Localization with Mobile Anchor Points in Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT), vol. 54, no. 3, pp. 1187-1197, May 2005.

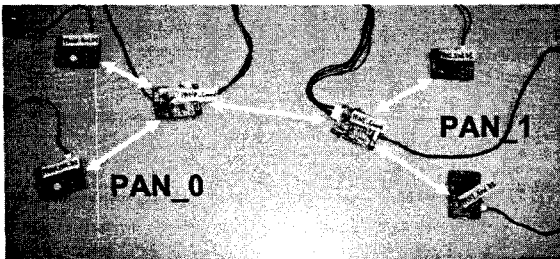


그림 5. 상용 임베디드 장치를 이용한 비콘 충돌 기법 검증