The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 18, No. 1, pp.37-41, Feb. 28, 2018. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.1.37
JIIBC 2018-1-6

IEEE802.15.4e TSCH의 소비전력에 대한 성능평가

Performance Evaluation on the Power Consumption of IEEE802.15.4e TSCH

김동원*, 윤미희**

Dongwon Kim*, Mi-Hee Youn**

요 약 본 논문에서는 참고문헌[1] 논문에서 제안한 고유의 링크 스케줄링 방법이 적용된 IEEE802.15.4e TSCH (Time-Slotted Channel Hopping)의 전력 소비 측면에서 절감 능력을 기존 단일채널 IEEE802.15.4와 비교하여 분석한다. TSCH 방식이 기존 방식에 비해 어떤 트래픽 조건하에서도 전력소모가 적게 하는 것으로 나타난다. 그 이유는 첫째, 충돌이 발생하지 않는 스케줄링 방식으로 인해 백오프 시간이 없다는 점과 둘째, MAC 오프셋 시간변수들의 차이로 인한 것으로 판단된다. 마지막으로 TSCH에서는 디바이스들은 자신의 스케줄이 아닌 타임 슬롯 동안은 sleep을 통해 전력 소모를 줄일 수 있음을 볼 수 있다.

Abstract In this paper, we evaluate the power consumption of IEEE802.15.4e TSCH which uses the specific link scheduling scheme proposed in reference[1]. And we also compares it with the power consumption of conventional single channel IEEE802.15.4. The power consumption of IEEE802.15.4e TSCH is smaller than the conventional one under the any conditions of traffic. The reasons can be explained as the followings. Firstly, TSCH does not have backoff time because of using the collision free link scheduling. Secondly, there is the timing difference of MAC offset parameter between TSCH and conventional IEEE802.15.4 Lastly, the devices in TSCH mode sleep during the time slots which are not assigned to itself.

Key Words : IEEE802.15.4e, TSCH, power consumption, power saving

Ⅰ. 서 론

사물 인터넷으로의 진화에 따라서 다양한 기기들이 IoT 디바이스로 변화되고 있는데, IoT 디바이스들은 다양한 네트워크 방식으로 서로 연결되어 인터넷 망을 구축하게 된다. 이들 IoT 디바이스는 다양한 네트워크의 접속을 위한 통신 수단이 구비되며, 이러한 네트워크의 접속을 위해서 IoT 디바이스의 통신 수단에 대한 네트워크 접속 정보의 설정이 필요하며 여러 모듈들이 필요하다.

특히 산업용 무선 IoT 모듈 및 이를 활용한 공정제어, 재난안전관리시스템 등의 구축시 무선 MAC의 효율성에 관한 연구 또한 중요하게 다뤄지고 있다. 또한 기존의 무선 IoT 모듈들을 이용하기 위해서는 IEEE802.15.4 혹은 Zigbee와 같은 방법을 사용하였으나, 수용노드 개수의 한계 및 채널 간섭으로 인한 문제점이 발생하였다.[1-5]

이러한 문제점을 개선하고자 채널과 슬롯의 스케줄링

*정회원, 충북도립대학 반도체전자과
**정회원, 충북도립대학 컴퓨터보안과
접수일자: 2017년 12월 15일, 수정완료: 2018년 1월 15일
게재확정일자: 2018년 2월 9일

Received: 15 December, 2017 / Revised: 15 January, 2018
Accepted: 9 February, 2018
*Corresponding Author: won@cpu.ac.kr
Professor, Dept. of Semiconductor Electronics, Chungbuk Prov. Univ., Korea

방식이 참고문헌[1] 논문에서 제안되었고 최대 스루풋(throughput)과 최소 지연(delay) 관점에서 성능을 비교 분석하였다.

본 논문에서는 참고문헌[1] 논문에서 제안한 스케줄링 방식을 적용할 경우 기존 단일채널 IEEE802.15.4와 비교하여 소비전력 측면에서의 우수성을 검증하고자 한다.

II. 제안된 IEEE802.15.4e TSCH 스케줄링 방식[1]

네트워크에 조인하는 디바이스는 EB(enhanced beacon)를 스캔한다. 광고노드로부터 어떤 한 EB를 받는 즉시, 상위계층에게 이를 통지하고, 상위계층은 받은 EB에 포함된 정보를 이용하여 slotframe과 link를 초기화하며, 디바이스를 TSCH 모드로 전환시킨다. 그런 후, 디바이스는 통신자원들(slotframe들과 link들)을 할당한다. 그리고 자기차례에 광고를 시작할 수도 있다.

디바이스들 간에 직접 통신이 가능한 한 링크(link)는 t(slot in the frame)와 $chOf$(Channel offset)의 쌍으로 다음과 같이 주어진다.

$$\text{a link}[t,\ chOf] \tag{1}$$

ASN은 네트워크가 설치 동작된 이래로 지나간 슬롯의 토탈 개수를 나타내며 다음과 같다.

$$\text{ASN}=(k\cdot S+t), \tag{2}$$

여기서 S는 the slotframe size, k the slotframe cycle을 뜻한다.

채널 오프셋은 동작주파수 f로 다음 식과 같이 변환된다.

$$f = F\{(\text{ASN} + chOf) \mod n_{ch}\}, \tag{3}$$

여기서 n_{ch}는 channel의 토탈 개수를 뜻한다.

F는 Channel Hopping Seq. Table을 통한 look-up 함수이다. S와 n_{ch}는 서로 소(prime)이다.

따라서 충돌이 일어나서는 안 되는 링크(non conflict link)는 유일한 값의 t와 $chOf$의 쌍을 할당해주면 된다는 것이다.

한 슬롯프레임내에 타임슬롯의 개수 S 와 채널 개수 n_{ch} 인 네트워크에서 전체 링크의 쌍 표현을 $S\times n_{ch}$(집합요소가 타임슬롯 오프셋 k와 채널오프셋 j의 쌍, 여기서 $0\le k\le S-1$, $0\le j\le n_{ch}-1$)집합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{link}\{t=k,\ chOf=j\} \in \Phi$$
$$\Phi = \{\{0,\ 0\},\{0,\ 1\},\ldots,\{0,\ j\},\ldots,\{0,\ n_{ch}-1\},$$
$$\{1,\ 0\},\{1,\ 1\},\ldots,\{1,\ j\},\ldots,\{1,\ n_{ch}-1\},$$
$$\vdots$$
$$\{k,\ 0\},\{k,\ 1\},\ldots,\{k,\ j\},\ldots,\{k,\ n_{ch}-1\},$$
$$\vdots$$
$$\{S-1,\ 0\},\{S-1,\ 1\},\ldots,\{S-1,\ j\},\ldots,\{S-1,\ n_{ch}-1\}\} \tag{4}$$

광고노드는 집합 Φ의 요소에 한비트씩을 할당하여 그 링크가 점유이면 1, 그렇지 않으면 0으로 표현한다. 광고노드는 해당 링크의 점유여부를 포함하는 비트열(집합 Φ를 비트표현) 을 EB에 포함시켜 광고를 하게 된다.

새롭게 디바이스가 조인할려고 할때 EBs들의 집합요소들의 값을 모두 OR 시켰을때 1로 표시되는 링크는 1홉 또는 2홉 이내에서 점유되어 사용되는 링크를 뜻한다. 따라서 이러한 링크를 제외한 0으로 표시되는 링크 중에서 하나를 랜덤(random)하게 선택하면 된다. 결과적으로 7번과 8번 요소가 프리(free)하게 남으며 이중 하나 7을 선택하면, 새로운 노드는 자신의 스케줄을 요소 7번에 해당하는 link (k, j) 를 취득하고 $f = F\{(\text{ASN} + chOf) \mod n_{ch}\}$ 식과 채널매핑테이블을 통해 채널 호핑 시퀀스를 따라 부모노드에 조인하고 통신을 할 수 있다.

2홉 이내의 자기 주변에서 관찰되는 스케줄을 피해서 자신의 스케줄을 잡게 됨으로 인해 TSCH에서 유일한 링크를 할당하여 충돌이 없는 링크 설정이 가능하게 할 수 있다.

III. 소비 전력 분석

1. IEEE802.15.4 전력소모

모든 노드들이 서로 신호의 범위내에 있다고 가정한다.

η_{tx}, η_{rx}, η_{sleep}, 단위시간당 소모되는 에너지(the energy dissipated per unit time) 전송모드, 수신모드, sleep 모드, λ_s 센서 노드측 패킷 도착율을 각각 나타낸다.

t_{SI}는 수퍼프레임 인터벌. t_{SLEEP}은 sleep 인터벌을 나타낸다. N은 네트워크내의 디바이스 개수를 나타낸다.

T_{D-DATA}, T_{D-ACK} 은 각각 DATA, ACK 패킷 하나를 전송하는데 걸리는 평균 시간을 뜻한다.

P_{tx}, P_{rx}, P_{sleep}는 센서노드가 각각 전송모드, 수신모드, 슬립모드에서의 평균 전력 소모를 나타낸다.

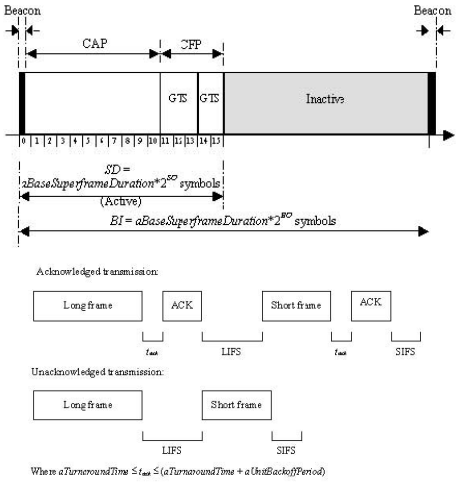

그림 1. IEEE802.15.4 송수신 타이밍도
Fig. 1. Send/Receive timing diagram in IEEE802.15.4

그림1과 같이 수퍼프레임사이클 구조를 가지며 송수신 타이밍 파라미터가 주어질 때 송수신 활동시 소비전력을 구하여 본다.

IEEE802.15.4 센서노드의 경우 NAV 방식을 사용하지 않는다면, 수퍼프레임 인터벌 중 슬립 구간을 제외하고는 깨어 있으면서 수신모드의 전력을 소모할 것이다.

$$P_{15.4_rx} = \eta_{rx}(t_{SI} - t_{SLEEP})/t_{SI} \quad (5)$$

송신시에는 data ack 혹은 data req. ack data ack 경우 중 어크날리지먼트 전송방식을 쓴다는 가정하에 연결된 노드간에 데이터를 한번 주고 한번 받고 한다는 가정하에 다음과 같은 트래픽 부하가 발생할 것이며, 안정 조건으로는 타임 슬롯 시간을 넘어가지 않는 범위이다.

$$\rho_{15.4} = N\lambda_s(T_{D-DATA} + t_{ack} + T_{D-ACK} + 2\tau + \overline{Backoff_Time} + 2BackoffSlot_Time + LIFS + SIFS) \quad (6)$$

$$\rho_{15.4} \le (t_{SI} - t_{SLEEP})/t_{SI} < 1 \quad (7)$$

송신시 전력소모는 상기 트래픽부하에 비례하여 다음과 같다.

$$P_{15.4_tx} = \eta_{tx}\rho_{15.4} \quad (8)$$

한 수퍼프레임 사이클내에 슬립구간동안은 슬립을 하므로 그 동안의 전력 소모는 다음과 같다.

$$P_{15.4_sleep} = \eta_{sleep}t_{SLEEP}/t_{SI} \quad (9)$$

따라서 센서노드의 한 수퍼프레임 사이클 동안 소모되는 단위시간당 전력소모는 송신, 수신, 슬립 동작에 따른 전력 소모의 합으로 다음과 같다.

$$P_{15.4_device} = P_{15.4_tx} + P_{15.4_rx} + P_{15.4_sleep} \quad (10)$$

2. TSCH 전력소모

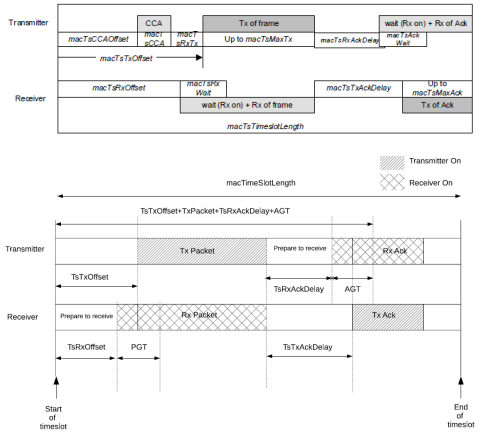

그림 2. TSCH 송수신 타이밍도
Fig. 2. Send/Receive timing diagram in TSCH

수신한 EB에 포함된 정보를 이용하여 slotframe과 link를 초기화하며, 디바이스를 TSCH 모드로 전환시킨다. 그런 후, 디바이스는 통신자원들(slotframe들과 link들)을 할당한다.

디바이스들간에 직접 통신이 가능한 한 링크(link)는 t(slot in the frame)와 $chOf$(Channel offset)의 쌍으로 주어진다.

예를 들어, 채널 n_{ch}, slotframe size S인 네트워크에서 $t_{SI}/S = macTsTimeslotLength$에 해당한다.

TSCH 모드로 전환된 후 그림 2와 같이 송수신시 정의된 타이밍 파라미터가 주어질 때 소비전력을 구하여 본다.

수신시 전력소모는 할당된 링크의 타임슬롯 활성화 구간에서만 Rx 디바이스를 On 시키면 되므로 다음 식과 같다.

$$P_{tsch_rx} = \eta_{rx}t_{SI}/S \quad (11)$$

송신시 전력소모는 링크의 타임슬롯을 넘어가지 않는 범위내에서 패킷 송신을 한다는 가정하에 다음과 같은 트래픽 부하가 발생할 것이며, 안정 조건으로는 타임 슬롯 시간을 넘어가지 않는 범위이다.

$$\rho_{tsch} = \lambda_s (macTsTxOffset + T_{D-DATA} + macTsTxAckDelay + T_{D-ACK} + 2\tau) \quad (12)$$

$$\rho_{tsch} \le t_{SI}/S < 1 \quad (13)$$

송신시 전력 소모는 상기 트래픽 부하에 비례해서 늘어난다.

$$P_{tsch_tx} = \eta_{tx}\rho_{tsch} \quad (14)$$

슬립시 전력소모는 자신에게 할당된 링크의 타임슬롯 구간외에는 모두 슬립을 할 수 있으므로 다음과 같이 주어진다.

$$P_{tsch_sleep} = \eta_{sleep} t_{SI}(S-1)/S \quad (15)$$

한 수퍼프레임 인터벌 동안 어떤 한 디바이스의 단위 시간당 전력소모는 다음과 같이 송신, 수긴, 슬립 전력소모의 합으로 주어진다.

$$P_{tsch_device} = P_{tsch_tx} + P_{tsch_rx} + P_{tsch_sleep} \quad (16)$$

III. 성능평가

성능해석에 사용된 네트워크 파라미터는 다음 표와 같다.

표 1. 네트워크 파라미터[3, 6, 7]
Table 1. Network parameter[3, 6, 7]

parameter	tsch	802.15.4
R_{ate}	250Kbps	
τ	1us	
L_{SHR} (5B)	160us	
L_{PHR} (1B)	32us	
t_{ack}	$12symbol(192\mu s) \le t_{ack} \le 32Symbol(512\mu s)$	
LIFS	-	40 symbol=640us
SIFS	-	12 symbol=192us
macMaxCSMABackoffs	-	2
macMinBE	-	3
macMaxBE	-	5
BackoffSlot_Time	-	20symbols=320us
macTsTxOffset	2120us	-
macTsTxAckDelay	1000us	-

ATMEL AT86RF231 라디오칩을 사용할 경우 송신수신시 약 12mA정도, 슬립시에는 0.4mA 정도의 전류가 흐른다.[참고문헌]따라서 전력소모를 계산하기위해 다음과 같이 가정한다. η_{tx}=40mW(12mA),, η_{rx}=40mW(12mA), η_{sleep}=1.3mW(0.4mA)

또한 IEEE802.15.4와 TSCH를 동일조건에서 비교하기 위해 채널은 1개만 사용한다고 가정하고 수퍼프레임 구간과 TSCH의 한 타임슬롯 길이를 같게하기 위해 t_{SI} = 450ms, t_{SLEEP}=420ms, S=15, N(the number of devices)=1로 가정한다.

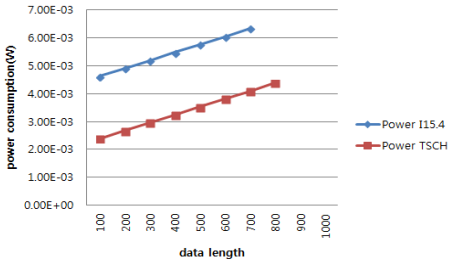

그림 3. 한 채널, 한 패킷 경우 전력소모
Fig. 3. Power Consumption (1 CH. 1 Packet)

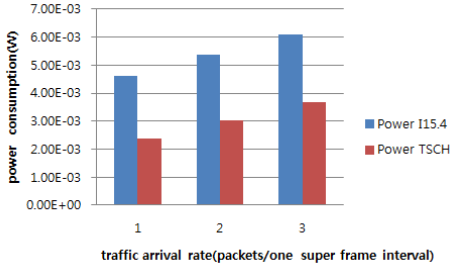

그림 4. 한 채널 경우 전력 소모
Fig. 4. Power consumption(1 CH)

그림 3에서 보듯이 IEEE802.15.4와 TSCH 전력 소모에서 차이가 나는 이유는 다음과 같다. 채널 한 개에 TSCH 한 타임 슬롯 길이만큼의 수퍼프레임구간을 설정하더라도 패킷하나를 전송하기위한 시간길이의 차이만큼 전력 소모가 발생함을 알 수 있다.

패킷 길이가 길어짐으로 인해 불안정 조건으로 IEEE802.15.4는 700바이트에서 발생하고, TSCH는 타임슬롯길이의 제한으로 인해 800바이트에서 불안정 조건이 발생한다.

그림 4에서는 한 채널을 통해 패킷 발생율의 변화를 주었을 때 전력 소모를 관측하면 TSCH 모드에서는 충돌이 생기지 않으므로 백오프 시간의 부재 등으로 인한 전력 소모에서 이득을 보는 것으로 나타난다.

네트워크에 수용되는 디바이스의 수를 늘이게 되면 IEEE802.15.4는 수퍼프레임 구간에 수용할 수 있는 트래픽 부하에 의해 안정조건을 벗어나고 상대적으로 전력

소모도 많은 편이다. 하지만 TSCH는 15슬롯 *16채널= 240 링크 수의 범위안에 있으면 충돌없이 할당이 되므로 안정조건내에서 저전력으로 트래픽 수송 성능을 보장할 수 있음을 볼 수 있다.

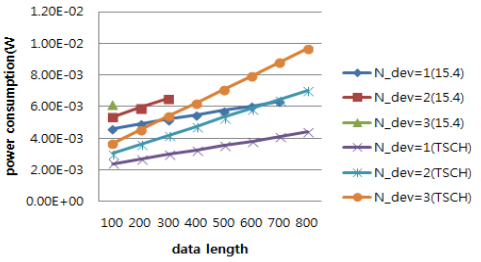

그림 5. 디바이스 수에 따른 전력소모
Fig. 5. Power Consumption according to the number of devices

그림 5에서는 TSCH를 S=1, $n_{ch}=16$ 일 경우 전력소모를 보여준다. 전송 데이터길이가 길어지고 네트워크에 수용되는 디바이스 개수가 늘어나도 TSCH가 전력소모가 적음을 알 수 있으며, 멀티채널과 스케줄드 타임슬롯에 의해 동작하는 TSCH가 단일채널 IEEE802.15.4에 비해 안정된 영역이 넓음을 알 수 있다.

IV. 결 론

TSCH무선 MAC의 표준 규격은 IEEE802.15.4를 통해 제시되어 있으나, 코디네이터와 디바이스들간에 협력에 의한 스케줄링 방법에 대해서는 표준에서 다루지 않고 있으며, 각자 고유한 방법으로 구현하는 실정이다. 채널 타임슬롯 스케줄링 방법을 제시하고 기존 단일채널 IEEE802.15.4와 본 제안을 활용한 TSCH 방식의 성능을 전력소모 관점에서 살펴보고 비교하였다.

TSCH는 15슬롯 *16채널= 240 링크 수의 범위안에 있으면 충돌없이 할당이 되므로 안정조건내에서 저전력으로 트래픽 수송 성능을 보장할 수 있음을 볼 수 있다.

따라서 스케줄드 타이슬롯 방식 TSCH가 스루풋[1]뿐만 아니라 전력소모 측면에서도 우월한 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

TSCH 방식의 소비전력 절감 능력은 다음의 이유로 판단된다. 첫째, 충돌이 발생하지 않는 스케줄링 방식으로 인해 백오프 시간이 없다는 점과 둘째, MAC 오프셋 시간변수들의 차이로 인한 것으로 판단된다. 마지막으로 TSCH에서는 디바이스들은 자신의 스케줄이 아닌 타임슬롯 동안은 sleep을 통해 전력 소모를 줄일 수 있음을 볼 수 있었다.

References

[1] Mi-Ryong Park, Dongwon Kim, “Scheduling Scheme and Performance Analysis of IEEE802.15.4e TSCH,” The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC) VOL. 17 No. 5, Oct., 2017, pp.43-49.

[2] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std 802.15.4-2006, Sep. 2006.

[3] IEEE Std 802.15.4eTM-2012(Amendment to IEEE Std 802.15.4TM-2011)

[4] D. W. Kim, T. G. Park, “An Energy Efficient MAC Protocol Providing Guaranteed Service for Wireless Sensor Network,” KSII TIIS Vol. 5, Issue 1, 2011.1.31, pp. 123-140

[5] Donwon Kim, "Multi-Channel Time Division Scheduling for Beacon Frame Collision Avoidance in Cluster-tree Wireless Sensor Networks," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC) VOL. 17 NO. 3, June 2017, pp.107-114.

[6] Xavier Vilajosana, Qin Wang, Fabien Chraim, Thomas Watteyne, Tengfei Chang, and Kristofer S. J. Pister, “A Realistic Energy Consumption Model for TSCH Networks,” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 14, NO. 2, FEBRUARY 2014

[7] http://www.atmel.com/images/doc8111.pdf, AT86RF231 datasheet

저자 소개

김 동 원(정회원)
• 2017년 제17권 제3호 참조

윤 미 희(정회원)
• 2016년 제16권 제4호 참조