

IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA에서 시스템 처리율 향상을 위한 단말 수 추정을 통한 백오프 기간 튜닝 기법

이원형¹ · 황호영^{2*}

Tuning Backoff Period for Enhancing System Throughput with Estimating Number of Devices in IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA

Won Hyoung Lee¹ · Ho Young Hwang^{2*}

¹Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

^{2*}School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA(Slotted Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 네트워크에서 시스템 처리율 향상을 위해 동작 중인 단말 수 추정을 통한 백오프 기간 튜닝 기법을 제안한다. IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크에서는 각 단말이 채널을 항상 센싱하지는 않으므로, 제안하는 기법에서는 채널을 항상 센싱할 수 있는 PAN(Personal Area Network) 코디네이터를 사용하여 동작 중인 단말 수를 추정한다. 이 때, 실시간 단말 수 추정을 위해 단순 이동 평균 필터를 사용한다. PAN 코디네이터는 추정한 단말 수에 따라 튜닝한 최적의 백오프 기간을 비콘 프레임에 담아 PAN 코디네이터에 연결된 단말들에게 전달한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 단말 수 추정에 대한 성능과 시스템 처리율에 대한 성능을 평가한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 IEEE 802.15.4 표준보다 더 높은 시스템 처리율을 얻을 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a scheme that tunes the backoff period for enhancing the system throughput with estimating the number of devices in IEEE 802.15.4 slotted carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) networks. Since each device does not sense the channel always in IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA networks, a personal area network (PAN) coordinator is used to estimate the number of active devices. The PAN coordinator broadcasts an optimal backoff period for the estimated number of devices through a beacon frame. In order to estimate the number of devices in run time, a simple moving average filter is utilized. We show the performance of our proposed scheme in terms of the estimated number of devices and the system throughput. The simulation results show that our proposed scheme can obtain higher system throughput than the IEEE 802.15.4 standard.

키워드 : IEEE 802.15.4, CSMA/CA, 시스템 처리율, 백오프 기간

Keywords : IEEE 802.15.4, CSMA/CA, System Throughput, Backoff Period

Received 25 June 2018, Revised 3 July 2018, Accepted 30 July 2018

* Corresponding Author Ho Young Hwang(E-mail:hyhwang@kw.ac.kr, Tel:+82-2-940-8265)

School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.9.1243>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

저비용 및 저전력 통신을 위해 제안된 IEEE 802.15.4 LR-WPAN(Low-Rate Wireless Personal Area Network) 표준 프로토콜은 저전력 통신을 위한 지그비(ZigBee) 같은 센서와 사물인터넷(Internet of Things, IoT)에서 사용될 수 있는 프로토콜이다 [1-4]. IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA(Slotted Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 네트워크에서는 한정된 배터리로 오랜 시간동안 통신하기 위하여 각 단말은 프레임 전송할 때, 채널을 센싱하지 않는 랜덤 백오프(Backoff)를 수행하고, 그 후에 채널을 센싱하는 CCA(Clear Channel Assessment)를 두 번 수행한다. CCA의 수행 결과 다른 단말이 채널을 사용 중이면, CCA를 수행한 단말은 백오프 기간(Backoff Period)을 두 배 늘려서 랜덤 백오프를 다시 수행한다. 이로 인해 채널 센싱에 소비되는 전력은 줄어들 수 있지만, 시스템 처리율(Throughput)은 낮아질 수도 있다. 한편, 남아있는 슈퍼프레임(Superframe)의 길이동안 데이터 전송을 끝낼 수 없을 때에는 전송을 시도하지 않는다.

IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA의 성능 향상을 위한 연구들이 진행되어 왔다. 논문[5]에서는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA의 단점을 보완하기 위해 CSMA와 TDMA(Time Division Medium Access Protocol)를 같이 사용하는 채널 접속 방법을 제안하고, 시스템 처리율과 에너지 소비량에 대하여 비교 분석하였다. 논문[6]에서는 WLAN(Wireless Local Area Network) 단말의 간섭이 존재하는 상황에서 지그비 동작에 대한 DTMC를 제안하고, WLAN 단말의 간섭이 존재할 때 시스템 처리율을 향상시키고 에너지 소비량을 줄이기 위한 최적의 지그비 수와 데이터 프레임의 길이를 구하는 방법을 제안하고 그 성능을 보였다. 논문[7]에서는 IEEE 802.15.4 기반의 MWSN(Mobile Wireless Sensor Network)에서 에너지 소비를 줄이고 시스템 처리율을 향상시키기 위해, 방송되는 컨트롤 패킷의 양을 조절하고 노드 위치에 따라 전송 전력을 조절하는 모델을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 보였다. 논문[8]에서는 센서가 많을 때 적합한 IEEE 802.15.4 기반의 클러스터-트리 구조에서 처리율 향상을 위한 슈퍼프레임 길이 할당 기법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 평가하였다. 논문[9]에서는 IEEE 802.15.4 네트

워크에서 비협력 게임(Noncooperative Game) 이론을 사용하여, 시스템 처리율, 종단간 지연, 그리고 에너지 소비율에 대한 성능 향상을 위해 혼잡 제어 방법을 연구하였다.

단말 수를 추정하여 네트워크 성능을 향상시키기 위한 연구들도 진행되어 왔다. 논문[10]에서는 IEEE 802.11 WLAN에서 조건부 충돌 확률을 사용하는 단말 수 추정 기법을 제안하였고, 단말 수를 실시간으로 추정하기 위해 ARMA(Auto-Regressive Moving Average) 필터와 확장 칼만(Extended Kalman) 필터를 사용하였다. 논문[11]에서는 IEEE 802.11 WLAN에서 노이즈에 대한 사전정보 없이 단말 수를 추정하기 위해 확장 H infinity 필터를 제안하고 성능을 보였다. 논문[12]에서는 IEEE 802.15.4 기반의 WSN에서 대역폭 효율 및 에너지 효율을 향상시키기 위하여 논문[10]의 방법을 사용하여 추정된 경쟁하는 단말 수에 따라 최소 백오프 기간을 설정하는 방법에 대하여 연구하였다. 논문[13]에서는 IEEE 802.15.4 기반의 네트워크에서 단말이 처음 PNC(Piconet Coordinator)에 결합(Association)할 때, 결합에 소요되는 시간을 최소화하기 위한 최적의 백오프 기간을 구하였고, 이를 위한 단말 수 추정 알고리즘을 제안하고 IEEE 802.15.4 표준 방법과 비교하여 결합에 소요되는 시간이 줄어들 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크에서 각 단말들의 추가적인 채널 센싱 없이 시스템 처리율을 향상시키는 기법을 제안한다. IEEE 802.11 WLAN에서의 단말 수 추정을 위한 연구[10,11]와 IEEE 802.15.4 WPAN에서의 단말 수 추정을 위한 연구[12, 13]에서는 조건부 충돌 확률이 사용되었다. 기존의 단말 수 추정을 위한 연구[10-13]는 각 단말이 동일한 전송 확률을 가지고 있는 경우에 사용할 수 있다. 그러나 단말들이 독립적으로 추정한 단말 수에 따라 각 단말이 백오프 기간을 튜닝하면 추정 오차에 의하여 단말들의 백오프 기간이 서로 달라져 단말들의 전송 확률이 서로 달라질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 하나의 PAN 코디네이터(Coordinator)가 단말 수를 추정하고, 추정한 단말 수에 따라 튜닝한 백오프 기간을 비콘(Beacon) 프레임에 담아 방송한다. 한편, 전송에 참여하지 않는 PAN 코디네이터는 조건부 충돌 확률을 계산하기 어려울 수 있으므로, 본 논문에서는 조건부 충돌 확률 대신 단말들의 CCA 수행 확률을 이용하여 단말 수 추정을 수

행한다. PAN 코디네이터에 연결된 단말들은 수신한 비콘 프레임에 담긴 튜닝된 백오프 기간을 이용하여 랜덤 백오프를 수행한다. 이를 통해 시스템 처리율이 향상될 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통하여 보인다.

II. 시스템 처리율 향상을 위한 단말 수 추정을 통한 백오프 기간 튜닝 기법

본 장에서는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크에서 실시간으로 동작 중인 단말 수를 추정하고, 추정된 단말 수에 따라 백오프 기간을 튜닝하는 기법을 제안한다. 본 논문에서는 하나의 PAN 코디네이터에 다수의 단말이 연결되어 있는 스타 토폴로지(Star Topology) 네트워크에서 각 단말의 데이터 프레임 길이가 동일한 상황을 가정한다. 한편, IEEE 802.15.4 표준에서 Ack (Acknowledgment) 메커니즘은 필수가 아니고, 수신한 프레임의 AR(Acknowledgment Request) 필드의 값에 따라 PAN 코디네이터가 Ack 프레임을 전송할지를 결정하게 된다 [1]. 본 논문에서는 각 단말의 데이터 프레임의 AR 필드 값은 0인 상황, 즉, Ack 메커니즘은 사용하지 않는 상황을 가정한다. 또한 각 단말은 데이터 프레임만을 전송하고 PAN 코디네이터는 비콘 프레임만을 방송하는 상황을 가정한다. IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크에서, 단말은 에너지 절약을 위하여 채널을 항상 센싱하지는 않는다. 본 논문에서 제안하는 기법은 채널을 항상 센싱할 수 있는 PAN 코디네이터를 사용하여 단말 수를 추정한다. 또한, PAN 코디네이터는 추정된 단말 수에 따라 튜닝한 최적의 백오프 기간을 비콘 프레임에 담아 PAN 코디네이터에 연결된 단말들에게 전달한다. 그림 1은 제안하는 기법을 도식화한 것이다.

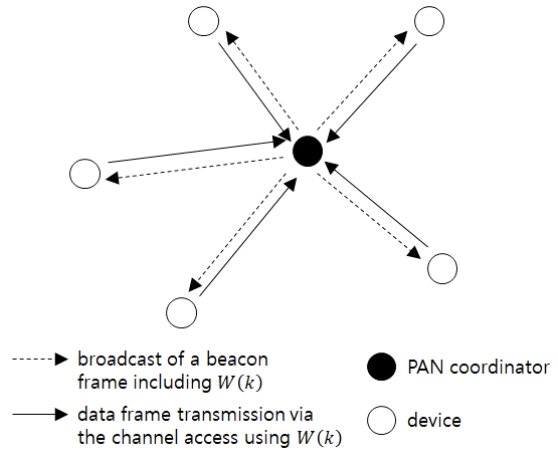


Fig. 1 An example of the proposed scheme

각 단말은 항상 전송할 데이터 프레임이 있다고 가정하면, 백오프 기간 W 를 사용하는 네트워크에서 각 단말이 백오프 단계에 있을 때 CCA를 수행할 확률은 $2/(W+1)$ 로 나타낼 수 있다 [7, 14]. IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크에서 동작 중인 단말의 수가 n 이라고 가정하면, 각 단말이 백오프 단계에 있을 때 적어도 한 단말이 임의의 백오프 슬롯(slot)에서 CCA를 수행할 확률 P_{CCA} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{CCA} = 1 - \left(1 - \frac{2}{W+1}\right)^n \quad (1)$$

동작 중인 단말 수 n 을 추정하기 위해 식 (1)을 n 에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$n = \frac{\log(1 - P_{CCA})}{\log\left(1 - \frac{2}{W+1}\right)} = g(W, P_{CCA}) \quad (2)$$

한편, 본 논문에서는 시스템 처리율을 최대화 하는 최적의 백오프 기간 W^* 를 n 과 L 에 대하여 실험적으로 구하였다. 여기서 L 은 데이터 프레임의 길이이다. $W^* = f(n, L)$ 을 만족하는 함수 f 는 본 논문에서는 실험적으로 얻은 매핑 표를 사용한다. 본 논문에서 사용하는 시스템 처리율은 백오프, CCA, 성공적인 전송, 그리고 충돌에 소요되는 평균 시간들 중 성공적인 전송에 소요되는 평균 시간이 차지하는 비율로 정의한다 [14]. 실험적으로 구한 $W^* = f(n, L)$ 는 표 1과 같다.

Table. 1 $W^*=f(n, L)$ for $L=3$ and $L=7$

n	W^* for $L=3$	W^* for $L=7$
5	17	22
15	56	71
25	93	120
35	131	169
45	169	217
55	207	266

IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크의 k 번째 슈퍼프레임에서 각 단말이 사용할 백오프 기간 $W(k)$ 는 $k-1$ 번째 슈퍼프레임에서 동작한 단말 수 $n(k-1)$ 를 이용하여, k 번째 슈퍼프레임의 시작에서 PAN 코디네이터가 계산할 수 있다. 또한, k 번째 슈퍼프레임에서의 각 단말이 백오프 단계에 있을 때 적어도 한 단말이 CCA를 수행할 확률 $P_{CCA}(k)$ 를 얻을 수 있다면 k 번째 슈퍼프레임에서 동작한 단말 수 $n(k)$ 을 추정할 수 있다. 이를 나타내면 다음과 같다.

$$W(k)=f(n(k-1), L), \quad k \geq 1, \quad (3)$$

$$n(k)=g(W(k), P_{CCA}(k)), \quad k \geq 1 \quad (4)$$

한편, k 번째 슈퍼프레임에서의 $P_{CCA}(k)$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{P}_{CCA}(k)=\frac{C_T(k)}{C_1(k)} \quad (5)$$

여기서 $\hat{P}_{CCA}(k)$ 는 PAN 코디네이터가 채널 상태를 관측하여 추정하는 $P_{CCA}(k)$ 의 값이고, $C_T(k)$ 는 k 번째 슈퍼프레임에서 새로운 전송이 시작된 횟수이고, $C_1(k)$ 는 k 번째 슈퍼프레임에서 두 백오프 슬롯동안 연속해서 채널이 유희상태를 유지한 횟수이다. 이때 $C_1(k)$ 에 대하여, 남아있는 슈퍼프레임의 길이동안 단말이 데이터 전송을 완료할 수 없을 경우에는 전송을 시도하지 않으므로[1], 남아있는 슈퍼프레임의 길이동안 데이터 전송을 완료할 수 있는 경우에만 두 백오프 슬롯동안 연속해서 채널이 유희상태를 유지한 횟수를 센다.

식 (4)의 $P_{CCA}(k)$ 대신 $\hat{P}_{CCA}(k)$ 를 사용하여 $n(k)$ 를 추정하면 다음과 같다.

$$\hat{n}(k)=g(W(k), \hat{P}_{CCA}(k)) \quad (6)$$

여기서 $\hat{n}(k)$ 는 k 번째 슈퍼프레임에서 동작한 단말 수 $n(k)$ 에 대한 추정 값이다. 본 논문에서는 단말 수 추정에 있어서 각 단말이 항상 전송할 데이터 프레임이 있다고 가정하였으나, 이러한 단말 수 추정 방식은 각 단말이 항상 전송할 데이터 프레임을 가지지는 않는 경우에도 유효하다 [10,11].

한편, 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 네트워크에서 실시간으로 단말 수를 추정하기 위하여 단순 이동 평균(Simple Moving Average) 필터를 사용하는 단말 수 추정 기법을 제안한다. 제안하는 단말 수 추정에 대한 단순 이동 평균 필터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{n}_{mov}(k)=\sum_{j=\max(0, k-q+1)}^k \frac{\hat{n}(j)}{\min(k+1, q)} \quad (7)$$

여기서 q 는 이동 윈도우(Moving Window)의 크기이다. $\min(k+1, q)$ 와 $j=\max(0, k-q+1)$ 는 샘플의 수가 q 개 이하가 되지 않았을 때는 이동 평균 계산에 샘플 전체를 사용한다는 것을 의미한다.

한편, 식 (7)을 통해 얻은 k 번째 슈퍼프레임에서 동작한 단말 수의 추정 값 $\hat{n}_{mov}(k)$ 는 정수가 아닐 수 있다. 이때, $\hat{n}_{mov}(k)$ 를 사용하여 $k+1$ 번째 슈퍼프레임에서 사용할 백오프 기간 $W(k+1)$ 는 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$W(k+1)=f([\hat{n}_{mov}(k)], L) \quad (8)$$

여기서 $[x]$ 는 x 의 소수점 첫째 자리의 수가 5 이상이면 x 보다 큰 정수 중 가장 작은 값을, 그렇지 않으면 x 보다 작거나 같은 정수 중 가장 큰 값을 의미한다.

III. 제안하는 기법의 성능 평가 및 분석

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 기법의 성능 평가 및 분석을 위하여 시뮬레이션을 통해 실시간 단말 수 추정에 대한 성능과 시스템 처리율에 대한 성능을 평가한다. 시뮬레이션은 Python 3.5 언어를 이용하여 구현한 시뮬레이터를 통해 수행한다. 제안하는 기법의 시스템

처리율 향상에 대한 성능 평가를 위하여 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 표준을 사용하는 경우의 시스템 처리율과 비교한다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 2와 같다. 데이터 프레임의 길이는 3 백오프 슬롯, 비콘 프레임의 길이는 3 백오프 슬롯으로 한다. 백오프 기간의 초기 값은 10으로 한다. 이는 데이터 프레임의 길이가 3 백오프 슬롯이고 동작 중인 단말 수가 3일 때 최적의 백오프 기간에 해당한다. 시뮬레이션동안, 단순 이동 평균 필터에서 사용할 이동 윈도우의 크기는 10으로 설정한다.

Table. 2 Simulation parameters

data frame length L	3 backoff slots
beacon frame length	3 backoff slots
CCA duration	0.4 backoff slots
macMinBe	4
macMaxBe	6
macMaxCsmBackoff	4
macSuperframeOrder	3
macBeaconOrder	3
$\hat{n}(0) = n(0)$	3
$W(1)$	10
moving window q	10

그림 2는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 표준 기법과 제안하는 단순 이동 평균 필터를 사용하는 단말 수 추정을 통한 최적의 백오프 기간 튜닝 기법에 대해

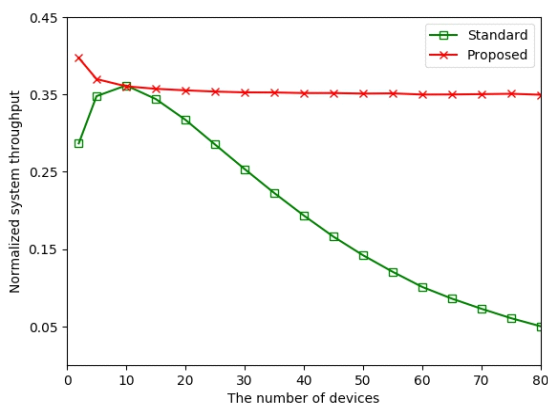


Fig. 2 Normalized system throughput of the proposed scheme versus the number of devices

각각 10번의 시뮬레이션을 수행하여 얻은 평균 시스템 처리율이다. 그림 2에서 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 표준 기법을 사용하는 경우에 단말 수가 증가하면서 시스템 처리율이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면 제안하는 단순 이동 평균 필터를 사용하여 실시간으로 추정된 단말 수에 따른 최적의 백오프 기간으로 튜닝하는 기법의 경우, 단말 수가 많아져도 0.35 정도의 시스템 처리율을 유지하는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 시뮬레이션동안 제안하는 기법을 사용하여 PAN 코디네이터가 실시간으로 추정된 단말 수와 실제 단말 수를 비교한다. 그림 4는 제안하는 기법을 사용하여 추정된 단말 수에 대하여 매핑 표를 통해 얻어진 백오프 기간과 실제 단말 수에 대하여 매핑 표를 통해 얻어진 백오프 기간을 비교한다. 시뮬레이션은 그림 3과 그림 4 각각에 대하여 총 800 슈퍼프레임동안 진행되었고, 단말 수가 10인 경우와 20인 경우에 대하여 400 슈퍼프레임씩 독립적으로 수행되었다. 그림 3에서 실제 단말 수가 10인 초반 400 슈퍼프레임 시뮬레이션 구간 동안 PAN 코디네이터가 추정된 평균 단말 수는 9.5794이고, 이 시뮬레이션 구간동안 추정된 단말 수에 대한 표준편차는 0.4509이다. 그림 3에서 실제 단말 수가 20인 후반 400 슈퍼프레임 시뮬레이션 구간동안 PAN 코디네이터가 추정된 평균 단말 수는 19.5788이고, 이 시뮬레이션 구간동안 추정된 단말 수에 대한 표준편차는 0.9464이다. 그림 4는 PAN 코디네이터에서 제안하는 기법을 사용하여 추정된 단말 수에 대하여 매핑 표를 통해 백오프 기간을 구할 수 있음을 나타낸다. 그림 4에서 최적의 백오프 기간이 37인 초반 400 슈퍼프레임 시뮬레이션 구간동안 PAN 코디네이터가 비콘 프레임에 담아 방송한 평균 백오프 기간은 35.2893이고, 이 시뮬레이션 구간동안 방송한 백오프 기간에 대한 표준편차는 2.8374이다. 그림 4에서 최적의 백오프 기간이 74인 후반 400 슈퍼프레임 시뮬레이션 구간동안 PAN 코디네이터가 비콘 프레임에 담아 방송한 평균 백오프 기간은 72.3641이고, 이 시뮬레이션 구간동안 방송한 백오프 기간에 대한 표준편차는 5.6540이다. 최적의 백오프 기간을 구하기 위하여 추정된 단말 수를 반올림하기 때문에, 추정된 단말 수의 오차가 0.5보다 작으면 PAN 코디네이터는 최적의 백오프 기간을 얻을 수 있다.

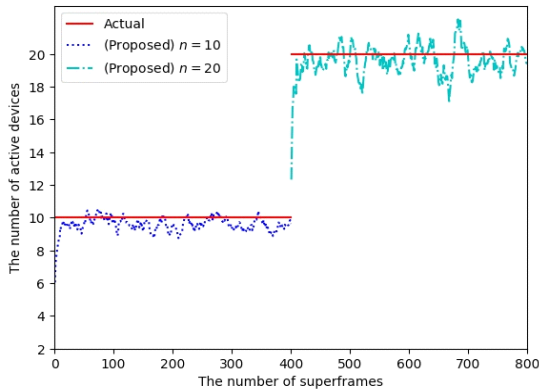


Fig. 3 Estimated number of active devices for the proposed scheme in run time with $n = 10$ and $n = 20$

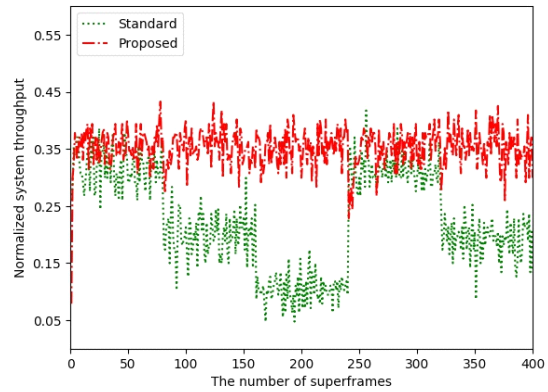


Fig. 5 Normalized system throughput of the proposed scheme in run time

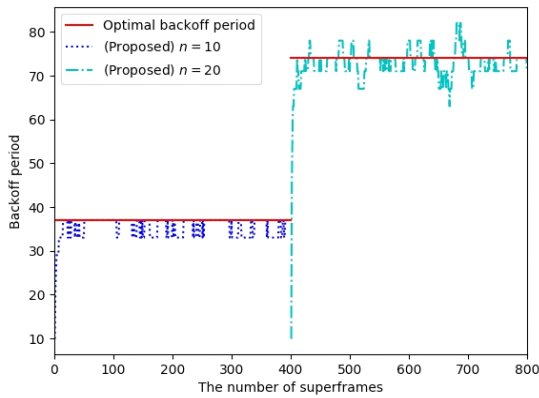


Fig. 4 Backoff period of the proposed scheme in run time with $n = 10$ and $n = 20$

그림 5는 400 슈퍼프레임동안 진행한 시뮬레이션의 결과이다. 시뮬레이션에서 동작하는 단말 수는 80 슈퍼프레임마다(20, 40, 60, 20, 40)으로 변화한다. 그림 5에서, IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 표준 기법을 사용하는 경우 단말 수가 많은 구간에서는 시스템 처리율이 크게 감소하지만, 제안하는 기법을 사용하여 백오프 기간을 튜닝하는 경우에는 전반적으로 0.35 정도의 시스템 처리율을 유지함을 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA에서 PAN 코디네이터를 사용하여 추정된 동작 중인 단말 수에 따라 백오프 기간을 튜닝하는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법에서는 단말 수의 실시간 추정을 위해서 단순 이동 평균 필터를 사용하였다. 제안하는 기법에 대하여, 시뮬레이션을 통해 실시간 단말 수 추정에 대한 성능과 시스템 처리율에 대한 성능을 평가하였다. 제안하는 기법의 시스템 처리율에 대한 성능 평가를 위해 IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 표준 기법의 시스템 처리율과 비교하였다. IEEE 802.15.4 슬롯 기반 CSMA/CA 표준 기법의 경우, 단말 수가 증가하면서 시스템 처리율이 크게 감소하지만, 제안하는 기법의 경우 단말 수가 증가하여도 0.35 내외의 시스템 처리율을 유지하는 것을 보였다. 또한, 제안하는 기법은 단말 수가 주기적으로 변하는 환경에서도 0.35 내외의 시스템 처리율을 유지함을 보였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2012R1A1A1041835) and by the Research Grant of Kwangwoon University in 2017.

REFERENCES

[1] IEEE Standard 802.15.4, *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*, IEEE, 2015.

[2] M. Khanafer, M. Guennoun, and H. T. Mouftah, "A survey of beacon-enabled IEEE 802.15.4 MAC protocols in wireless sensor networks," *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 856-876, Second Quarter 2014.

[3] J.-H. Huh, S.-M. Je, and K. Seo, "Design and simulation of foundation technology for Zigbee-based smart grid home network system using OPNET simulation," *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, vol. 5, no. 4, pp. 81-89, Aug. 2015.

[4] P. Park, "Routing and medium access control interactions for Internet of Things," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 10, pp. 2465-2472, Oct. 2015.

[5] M. H. S. Gilani, I. Sarrafi, and M. Abbaspour, "An adaptive CSMA/TDMA hybrid MAC for energy and throughput improvement of wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 1297-1304, June 2013.

[6] J. W. Chong, C. H. Cho, H. Y. Hwang, and D. K. Sung, "An adaptive WLAN interference mitigation scheme for ZigBee sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 8, Article ID 851289, Aug. 2015.

[7] M. Al-Jemeli and F. A. Hussin, "An energy efficient cross-layer network operation model for IEEE 802.15.4-based mobile wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 684-692, Feb. 2015.

[8] E. Leão, C. Montez, R. Moraes, P. Portugal, and F. Vasques, "Superframe duration allocation schemes to improve the throughput of cluster-tree wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 17, no. 2, pp. 1-35, Jan. 2017.

[9] H. A. A. Al-Kashoash, M. Hafeez, and A. H. Kemp, "Congestion control for 6LoWPAN networks: A game theoretic framework," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 760-771, June 2017.

[10] G. Bianchi and I. Tinnirello, "Kalman filter estimation of the number of competing terminals in an IEEE 802.11 network," in *Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp. 844-852, Mar. 2003.

[11] T. Kim, J. Lim, and D. Hong, "Performance comparison in estimating the number of competing terminals in IEEE 802.11 networks (Kalman vs. H infinity filter)," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 37, no. 11, pp. 1001-1011, Nov. 2012.

[12] X. Zhao, W. Zhang, W. Niu, Y. Zhang, and L. Zhao, "Power and bandwidth efficiency of IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," in *Proceedings of the 7th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*, pp. 243-251, Oct. 2010.

[13] J. W. Chong, H. Y. Hwang, D. K. Sung, and Y. Nam, "A comprehensive analysis of association process for IEEE 802.15.4 wireless networks," *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 70-77, June 2014.

[14] T. R. Park, T. H. Kim, J. Y. Choi, S. Choi, and W. H. Kwon, "Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA," *Electronics Letters*, vol. 41, no. 18, pp. 1017-1019, Sept. 2005.



이원형(Won Hyoung Lee)

2017년 2월 : 광운대학교 컴퓨터공학과 학사
 2017년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 석사과정
 ※관심분야 : 무선네트워크, 센서네트워크, 사물인터넷 등



황호영(Ho Young Hwang)

2000년 2월 : KAIST 전자전산학과 학사
 2002년 2월 : KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 2월 : KAIST 전자전산학부 박사
 2002년 8월 ~ 2003년 8월 : 미국 국립표준기술연구소(NIST) 객원연구원
 2008년 9월 ~ 2010년 8월 : 캐나다 워털루대학교 박사후연구원
 2010년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터정보공학부 교수
 ※관심분야 : 이동통신시스템, 무선자원관리, 센서네트워크 등