

# IEEE 802.15.4에서 Contention Window 크기 변화가 데이터 처리량과 에너지 소비량에 미치는 영향 분석

노기철\*, 예석환\*\*, 이강우\*, 안종석\*\*  
 동국대학교 \*정보통신공학과, \*\*컴퓨터공학과  
 e-mail:{nox, yshsky, klee, jahn}@dgu.edu

## An Analysis of the Effect of IEEE 802.15.4 Contention Window Size to Throughput and Energy Consumption

Ki-chol Noh\* Seok-Hwan Ye\*\* Kang-woo Lee\* Jong-Suk Ahn\*\*  
 \*Dept of Information Communication, \*\*Dept of Computer Science,  
 Dong-guk University

### 요 약

본 논문은 802.15.4에서 CW(Contention Window)에 따른 성능과 에너지 소비량을 분석한다. 기존 연구에서는 802.15.4 표준안의 성능과 에너지 소비량을 분석하고, CW나 BE(Backoff Exponent)와 같은 변수를 변화시켜 시뮬레이션만으로 성능과 에너지 소비량을 비교하여 분석하였으나, 본 논문은 CW에 따른 성능과 에너지 소비량을 마코프 체인(Markov Chain)을 이용하여 수학적으로 분석을 하였다.

### 1. 서론

IEEE 802.15.4 표준[1]은 Low Rate - Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)의 물리 계층과 MAC 부계층을 규정하기 위한 표준이다. IEEE 802.15.4는 IEEE 802.15.1 블루투스나 IEEE 802.15.3 WPAN과 같은 고속/중속의 WPAN이 사용될 수 없는 저전력, 저비용을 요구하는 응용을 위하여 설계되었다. 이를 통해 IEEE 802.15.4 표준은 무선 센서, 무선 허브와 같은 제한된 출력과 성능으로 간단한 단거리 무선 통신을 필요로 하는 폭넓은 응용에 사용 될 수 있다.

현재까지 IEEE 802.15.4 표준에 대한 네트워크 성능과 에너지 소비량을 분석하기 위해 많은 연구가 진행되어왔다. [2]는 802.11 네트워크를 마코프 체인을 이용하여 수학적으로 분석하였고, [3-5]에서는 802.15.4 표준안을 마코프 체인을 이용하여 분석하여 데이터 처리량과 에너지 소비량을 구하였다. [6]에서는 backoff 범위를 다르게 하였을 때의 데이터 처리량을 분석하였고, [7]에서는 CW값을 3으로 하는 Three CCA, 비콘 다음에 CCA의 횟수를 Random으로 하는 Random CCA를 이용하여 네트워크의 성능향상을 도모하였다. [8]에서는 2번째 CCA에 실패 하였을 때 BE값을 다르게 하여 backoff 시간을 확장하여 충돌 확률을 줄이고자 하였다.

본 논문은 노드 수에 따라 성능 향상과 에너지 소비를 위한 적절한 CW값을 찾기 위해 CW에 따른 데이터 처리량과 소비된 에너지를 수학적으로 분석하고 CW와 데이터 처리량 그리고, 에너지 소비량과의 상관관계를 분석한다. 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서는 관련 연구로 802.15.4 표준안에 대해 기술하고 2차원 마코프 체인을 이용한 수학적 분석 방법을 설명한다. 3장에서는 IEEE 802.15.4의

CW에 따른 모델을 마코프 체인을 이용하여 수학적으로 분석한다. 4장에서는 수학적으로 분석한 수식으로 데이터 처리량과 소비된 에너지량을 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구 과제를 기술한다.

### 2. 관련연구

본 장은 2개의 절로 구성되어 있으며 2.1절에서는 802.15.4 표준안의 동작 원리와 CSMA-CA 알고리즘에 대해 설명하고 2.2절에서는 마코프 체인(Markov Chain)을 이용한 모델링 방식으로 표준안을 수학적으로 분석한다.

#### 2.1 802.15.4 표준안

802.15.4 표준안은 효율적인 에너지 사용을 위해 비콘 프레임의 경계로 정의되는 슈퍼프레임을 사용한다. 슈퍼프레임은 동작 구간과 비 동작 구간으로 구성된다. 동작 구간은 CAP와 CFP라는 두 개의 구간으로 구성되며 CAP동안에 데이터 전송을 원하는 노드들은 slotted CSMA-CA 알고리즘을 이용하여 경쟁한다. CFP는 GTS를 포함하여 비경쟁 기반의 접근 방식을 제공한다.

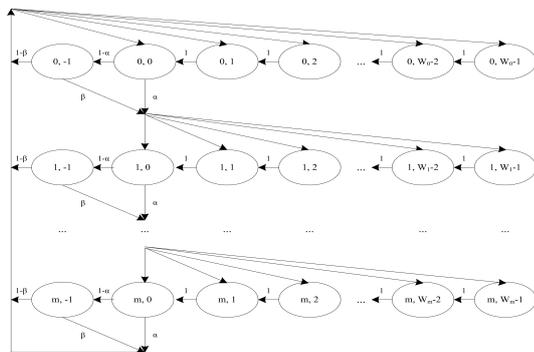
데이터 전송을 위해 각 센서 노드들은 CSMA-CA에 관련된 세 가지 파라미터 값(BE, CW, NB)을 초기화하는데, BE는 채널에 접속하기 전에 기다리게 되는 backoff 기간에 관계된 변수이다. CW는 전송 전에 필요한 idle한 backoff 기간의 수를 말하며, NB는 현재 전송을 시도할 때 수행한 CSMA-CA 알고리즘의 횟수를 의미한다. 전송 초기 단계에서 선택한 무작위 지연 시간이 흐른 뒤에 센서 노드는 채널을 감지하며 만약 다른 센서 노드에 의해 데이터 전송이 일어나고 있는 상황이라면 채널을 busy 상태라고 판단하고 NB의 값을 하나 증가시키며 CW 값을 재 초기화 한 후에 전송을 지연한다.

노드는 CCA(Clear Channel Assessment)를 수행하여 채널 상태를 판단한다. 만약 채널이 idle 상태라면 CW 값을 하나 감소한 후에 이 값이 0이면 전송을 시도하고, 그렇지 않으면 다시 CCA를 수행한다. 둘 이상의 센서 노드가 동시에 CCA를 끝낸 경우에는 동시에 데이터 전송이 이루어지기 때문에 충돌이 발생한다. 802.15.4 표준안은 무선 LAN(Local Area Network)의 표준안인 802.11과 유사한 동작 원리를 갖지만, 802.11처럼 매 backoff 시간마다 채널을 감지하는 방식이 아니라 backoff 기간이 지난 뒤에 연속된 2번의 CCA를 하는 차이점을 갖고 있다.

2.2 802.15.4 마코프 체인

802.15.4 표준안의 성능은 주로 단위 시간 당 데이터 전송량(Throughput)을 위주로 분석되어왔다. [3]에서 802.15.4 표준안을 2차원 마코프 체인을 이용하여 정확한 분석을 시도하였으며 본 논문에서의 데이터 처리량과 에너지 분석은 이러한 모델링을 기반으로 한다.

(그림 1)은 한 개의 센서 노드가 가질 수 있는 상태를 마코프 체인으로 표현한 것이다. 2차원 마코프 체인의 행은 전송을 지연한 횟수를 나타내며 첫 번째 행은 0번째 stage라 부르고 다음 행은 1번째 stage로 부른다. 열은 현재 센서 노드의 random backoff time을 의미하며 값이 2라면 backoff slot을 2개 기다린 후 CCA를 수행 한다. 센서 노드는 최대 *macMaxCSMABackoffs* 만큼의 전송을 시도하게 되며 그 이상 전송을 지연할 경우는 해당 프레임의 전송을 포기한다. 표준안에서 *macMaxCSMABackoffs*의 default값은 4로 되어 있으며 여기서는 간략히 *m*으로 표시한다.



(그림 1) 802.15.4 마코프 체인

마코프 체인을 이용하여 성능과 에너지 소비량을 분석하면 다음과 같다. 자세한 수식 전개는 [3]을 참고한다. 단위 시간 당 데이터 전송량인 *S*는 다음과 같다.

$$S = \frac{E[\text{average successful transmitted data bytes}]}{E[\text{average time interval}]} = \frac{P_s P_{tr} E[P] / [P_s P_{tr} T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_c + (1 - P_{tr}) P_b \sigma + (1 - P_{tr}) P_{CCA} T_{CCA} + 2(1 - P_{tr}) P_{2CCA} T_{CCA}]}{P_s P_{tr} E[p]} \quad (1)$$

성공적으로 보낸 bit당 소비된 에너지는 다음과 같다.

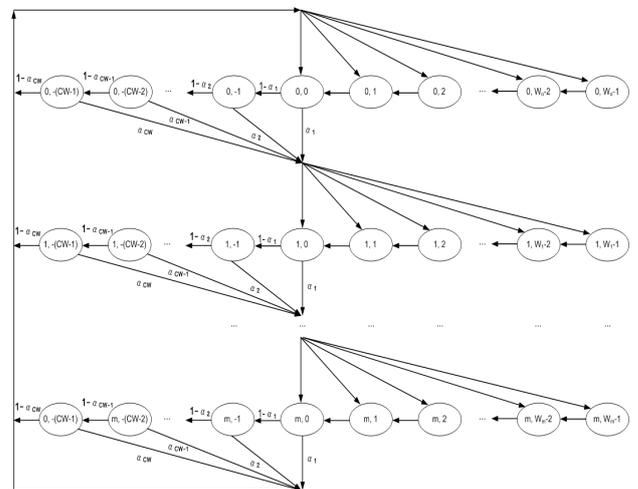
$$E_{avg} = \frac{[\text{energy per time}]}{E[\text{successful data transmission per time}]} = \frac{P_s P_{tr} E_s + P_{tr} (1 - P_s) E_c + (1 - P_{tr}) P_{CCA} T_{CCA} E_R + 2(1 - P_{tr}) P_{2CCA} T_{CCA} E_R}{P_s P_{tr} E[p]} \quad (2)$$

3. CW 크기 변화에 따른 802.15.4 마코프 체인

이 절에서는 CW 크기 변화에 따른 모델을 일반화 하여 여러 번 하였을 경우의 데이터 처리량과 전송 bit당 소비된 에너지양과의 관계를 바탕으로 서로의 상관관계를 알아보고자 한다.

3.1 CW 크기변화에 따른 데이터 처리량

(그림 2)는 CW 크기 변화에 따른 802.15.4 마코프 체인이다. 802.15.4 표준안과 같이 데이터 처리량과 에너지 소비량을 구하기 위해서 CW가 1, 2, 3일 때의 식을 이용하여 수학적 귀납법으로 CW가 변수일때의 데이터 처리량과 에너지 소비량을 구하여 상관관계를 알아보고자 한다.



(그림 2) CW 크기 변화에 따른 802.15.4 마코프 체인

*k*번째 CCA를 수행하였을 때 채널이 busy일 확률을  $\alpha_k$ 로 표현한다. *i* stage일 때 전송 전 마지막 state는 backoff time이 0일 때부터 CCA를 수행하므로  $b_{i, -(CW-1)}$ 로 나타낸다.

다음 stage로 넘어갈 확률을 *p*로 정의하고 CW가 1, 2, 3일 경우를 각각 표현하면  $\alpha_1, \alpha_1 + (1 - \alpha_1)\alpha_2, \alpha_1 + (1 - \alpha_1)\alpha_2 + (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)\alpha_3$ 로 나타낼 수 있다. 이 식을 하나의 식으로 나타하면 (3)과 같다. CW가 커질 때마다 식 뒤에 추가되는 부분은 CCA결과가 채널이 busy일 경우가 다음 stage로 넘어가는 경우이므로 CW가 커짐에 따라 추가된다.

$$p = \sum_{i=1}^{CW} \left( \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha_j) \right) \alpha_i, \text{ 단 } \alpha_0 = 0 \quad (3)$$

1번째 stage, backoff time이 0일 확률인  $b_{0,0}$ 를 CW가 1, 2, 3일 때 각각 구하면 다음과 같다. 단,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots$

$$b_{0,0} = \left[ \frac{W(1 - (2p)^{m+1})}{2(1 - 2p)} + \frac{1 - p^{m+1}}{2(1 - p)} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$b_{0,0} = \left[ \frac{(1 - \alpha_1)1 - p^{m+1}}{1 - p} + \frac{W(1 - (2p)^{m+1})}{2(1 - 2p)} + \frac{1 - p^{m+1}}{2(1 - p)} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$b_{0,0} = \left[ \frac{((1-\alpha_1) + (1-\alpha_1)(1-\alpha_2))(1-p^{m+1})}{1-p} + \frac{W(1-(2p)^{m+1})}{2(1-2p)} + \frac{1-p^{m+1}}{2(1-p)} \right]^{-1} \quad (6)$$

CW가 증가함에 따라 수식의 앞부분에 추가되는 부분이 증가하고 있음을 알 수 있다. 앞에 추가되는 수식은 CW가 증가함에 따라 stage가 추가되어서 생기는 부분이다. 이 부분이 규칙적으로 증가하기 때문에 CW에 따른 하나의 식으로 표현할 수 있다. (17)과 같이 표현된다.

$$b_{0,0} = \left[ \left( \sum_{k=1}^{CW-1} \prod_{i=1}^k (1-\alpha_i) \right) + \frac{1}{2} \right] \frac{(1-p^{m+1})}{1-p} + \frac{W(1-(2p)^{m+1})}{2(1-2p)} \quad (7)$$

이렇게 표현되는 이유는 뒤에 backoff 기간의 표현이 같기 때문이며, 추가되는 부분을 CW로 표현 할 수 있기 때문이다. 또 노드가 전송할 확률인  $\gamma$ 을 CW가 1, 2, 3일 때 구하면 다음과 같다.

$$\gamma = (1-\alpha_1)b_{0,0} \frac{1-p^{m+1}}{1-p} \quad (8)$$

$$\gamma = (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)b_{0,0} \frac{1-p^{m+1}}{1-p} \quad (9)$$

$$\gamma = (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-\alpha_3)b_{0,0} \frac{1-p^{m+1}}{1-p} \quad (10)$$

각 stage의 맨 왼쪽의 state를 모두 합친 값이  $\gamma$ 이기 때문에 위와 같이 나타내어진다. CW가 증가할수록  $(1-\alpha_{CW})$  값이 추가되는 것을 볼 수 있다. 또 하나의 식으로 표현해보면 (21)과 같다.

$$\gamma = \prod_{i=0}^{N_{CCA}-1} (1-\alpha_i)b_{0,0} \frac{1-p^{m+1}}{1-p}, \text{ 단 } \alpha_0 = 0 \quad (11)$$

단위 시간당 데이터 전송량인 S를 구할 때 2.2절과 다른 점은 CW의 변화에 따라 평균 CCA 횟수가 변하는 부분을 추가해 줘야한다.

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[p]}{P_s P_{tr} T_s + (1-P_s) P_{tr} T_c + (1-P_{tr}) P_b \sigma + (1-P_{tr}) T_{CCA} E[CCA]} \quad (12)$$

(22)식의 분자 부분은 성공적으로 보낸 데이터양을 의미하며 분모 부분은 성공적으로 데이터를 보내기 위해 걸린 시간을 의미한다. 분모의  $P_s P_{tr} T_s$ 는 데이터를 성공적으로 보냈을 때 걸린 시간을 의미하고,  $(1-P_s) P_{tr} T_c$ 는 전송은 했지만 성공적으로 전송하지 못하고 충돌이 발생했을 때의 시간을 의미한다.  $(1-P_{tr}) P_b \sigma$ 는 backoff 구간에 소비된 시간을 의미하고,  $(1-P_{tr}) T_{CCA} E[CCA]$ 는 CCA를 수행하는 동안 걸린 시간을 의미한다.  $E[CCA]$ 는 평균 CCA 횟수를 의미하며 (23)과 같이 구할 수 있다.

$$E[CCA] = \sum_{k=1}^{CW} k P_{kCCA} \quad (13)$$

$P_{kCCA}$ 는 k번째 CCA를 수행하여 채널상태가 busy일 확률을 의미한다. CW가 1, 2, 3일때의  $P_{kCCA}$  값을 구하면 다음과 같다.

$$P_{CCA} = \frac{\omega \alpha_1}{1-\gamma} \quad (14)$$

$$P_{2CCA} = \frac{\omega(1-\alpha_1)\alpha_2}{1-\gamma} \quad (15)$$

$$P_{3CCA} = \frac{\omega(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\alpha_3}{1-\gamma} \quad (16)$$

분모는 변화가 없고, 분자가 k에 따라서 변하는 것을 볼 수 있다. 이를 바탕으로 k번째 CCA확률인  $P_{kCCA}$ 는 (17)과 같이 표현한다.

$$P_{kCCA} = \frac{\omega \alpha_k \prod_{i=1}^{k-1} (1-\alpha_i)}{1-\gamma} \quad (17)$$

### 3.2 CW 크기 변화에 따른 에너지 소비량

에너지를 CW에 따라 구하기 위해 먼저 성공적으로 데이터를 전송했을 때의 에너지 소비량인  $E_s$ 와 전송했으나 충돌이 발생했을 때의 에너지 소비량인  $E_c$ 를 구하면 (18), (19)와 같다.

$$E_s = CW \cdot E_R T_{CCA} + E_T T_x + E_R T_{delay} + E_R T_{ack} \quad (18)$$

$$E_c = CW \cdot E_R T_{CCA} + E_T T_x + E_R T_{timeout} \quad (19)$$

$E_R$ 은 수신모드 때의 소비 전력을 의미하고,  $E_T$ 는 전송모드 때의 소비전력을 의미한다.  $T_{CCA}$ 는 CCA로 소비되는 에너지를 의미한다. 따라서  $E_s$ 에서의  $CW \cdot E_R T_{CCA}$ 는 CW만큼 CCA를 한 후 데이터를 전송했을 때의 에너지 소비량을 의미한다.  $T_x$ 는 데이터를 전송하는 데 걸린 시간을 의미한다. 따라서  $E_T T_x$ 는 데이터를 전송하는데 소비되는 에너지를 의미한다.  $T_{delay}$ 는 데이터와 ack사이의 시간을 의미한다. 한 backoff slot의 시간은 20 symbol이다. 데이터를 수신하고 ack를 전송하기 위해 전송모드로의 전환까지 필요한 시간은 12 symbol이다. 따라서 backoff slot에서 볼 때 데이터를 전송하고 남은 시간이 12 symbol보다 작다면 다음 backoff slot을 소비한 후에 전송한다. 따라서  $T_{delay}$ 는 최소 12 symbol에서 최대 32 symbol의 값을 가진다.

$T_{timeout}$ 은 데이터가 충돌되어 기다리게 되는 timeout시간을 의미한다. 충돌 되었을 때의 소비된 에너지인  $E_c$ 는  $E_s$ 와 마찬가지로 CW만큼 CCA를 한 후에 데이터를 전송하기 때문에 (19)로 표현된다. 성공적으로 보낸 bit당 소비된 에너지는 (20)으로 구할 수 있다.

$$E_{avg} = \frac{[energy \ per \ time]}{E[successful \ data \ transmission \ per \ time]} \quad (20)$$

$$= \frac{P_s P_{tr} E_s + P_{tr} (1-P_s) E_c + (1-P_{tr}) T_{CCA} E_R E[CCA]}{P_s P_{tr} E[p]}$$

분자는 데이터를 전송하기 위해 소비되는 에너지양을 의미하고, 분모는 성공적으로 전송한 데이터양을 의미한다.  $P_s P_{tr} E_s$ 는 데이터를 성공적으로 전송했을 때의 에너지 소비량을 의미하고,  $P_{tr} (1-P_s) E_c$ 는 데이터를 전송했으나 충돌이 발생했을 때의 에너지 소비량을 의미한다.  $(1-P_{tr}) T_{CCA} E_R E[CCA]$ 는 CCA를 수행하였을 때의 에너지 소비량을 의미한다. 시간당 데이터 처리량과 마찬가지로 CW에 따라  $E[CCA]$ 가 달라지기 때문에 에너지 소비량 식이 바뀌게 된다.

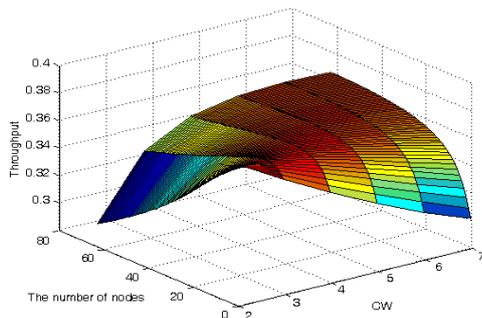
### 4. 성능 분석 및 평가

<표 1>은 수학적 분석과 시뮬레이션 환경을 구성하기 위한 802.15.4 표준안에 명시된 파라미터 집합을 나타낸다.

&lt;표 1&gt; 수학적 분석을 위한 파라미터 집합

Parameters	Value
Packet Payload	70 byte
MAC header	13 byte
PHY header	6 byte
ACK	11 byte
Channel Bit Rate	250 kbs
SIFS Period	12 symbol
LIFS Period	40 symbol
Ack_timeout	54 symbol
macMinBE	3
aMaxBE	5
macMaxCSMA	4
Rx(Transceiver power coonsumption)	20mW
Tx(Transceiver power coonsumption)	15mW

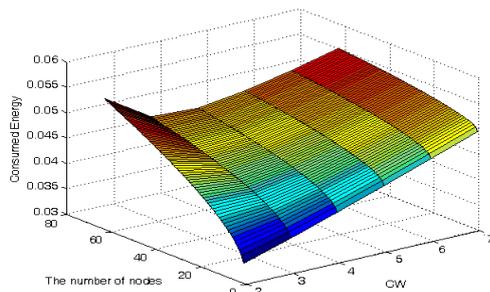
(그림 3)은 CW, node수, throughput의 3차원 그래프이다. 노드수가 적을 때에는 CW가 증가할수록 감소하지만 노드수가 점차 많아짐에 따라 CW가 증가할수록 데이터 처리량이 감소하지 않고 증가하는 것을 볼 수 있다. 노드수가 10 이상인 경우는 CW가 3인 경우가 더 데이터 처리량이 높고, 노드수가 18 이상인 경우에는 CW가 4인 경우가 데이터 처리량이 더 향상되었다.



(그림 3) 3차원 그래프(CW, node수, Throughput)

(그림 4)는 CW, node 수에 대한 에너지의 3차원 그래프이다. 노드수가 작을 때에는 CW가 증가할수록 소비되는 에너지도 커진다. 그러나 노드 수가 19개 이상일 때에는 CW가 2일 때 보다 3인 경우가 소비되는 에너지가 더 작고 나온다. 또 노드수가 57이상 일 때에는 CW가 3인 경우보다 CW가 4인 경우가 소비되는 에너지가 작게 나오는 것을 알 수 있다.

위의 결과로 노드 수가 증가함에 따라 데이터 처리량과 에너지가 감소하지만 CW값을 증가시키면 802.15.4 표준안보다 더 효율적인 경우가 생기는 것을 확인 할 수 있었다.



(그림 4) 3차원 그래프(CW, node수, 에너지)

## 5. 결론 및 향후 연구 과제

WPANs는 상대적으로 근거리에서 정보를 전달하는데 사용되는 네트워크를 의미한다. 또한 배터리 자원이 한정된 센서 노드로 구성되어 있기에 이를 효율적으로 지원하기 위해 IEEE에서는 802.15.4 표준안을 제정하였다.

본 논문에서는 CW에 따른 데이터 처리량과 에너지 소비량을 분석하고, 노드수가 증가함에 따라 적절한 CW 값을 모색하였다. 노드수가 19개 이상 일 경우에는 CW가 3일 경우가 데이터 처리량 향상과 소비되는 에너지를 줄일 수 있고, 노드수가 57개 이상일 경우에는 CW를 4로 하는 것이 데이터 처리량 향상과 효율적인 에너지 사용을 도모할 수 있다.

향후에는 위의 결과를 바탕으로 simulation을 하려고 한다. 또한 동적으로 네트워크의 상황을 판단하여 적응적으로 CW를 조정하는 방안에 대하여 연구할 계획을 갖고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] IEEE 802.15.4, Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs), IEEE, Sep. 2006.
- [2] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," IEEE Journal on selected areas in communications (JSAC), pp. 535-547, March 2000
- [3] Zhijia Chen, C. Lin, Hao Wen, Hao Yin, "An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA protocol in Low-rate wireless application", 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07), pp. 899-904, May 2007
- [4] 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, pp.1017-1019, Sept 2005
- [5] S. Pollin, M. Ergen, S. C. Ergen, B. Bougard, L. V. der Perre, F. Catthoor, I. Moerman, A. Bahai, P. Varaiya, "Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer", IEEE GLOBECOM 2006, Nov 2006.
- [6] J. G. Ko, Y. H. Cho, H. G. Kim, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 MAC with Different Backoff Ranges in Wireless Sensor Networks", Communication systems, 2006. ICCS 2006. 10th IEEE Singapore International Conference, pp.1-5, Oct 2006
- [7] J. H. Lee, S. J. Yoo, "Efficient of CCA Algorithm in IEEE 802.15.4 LR-WPAN", Korea Information and Communications Society, Sept 2007.
- [8] H. J. Ki, S. J. Bae, T. J. Lee, M. Y. Chung, "Random Backoff Time Extension Algorithm to Enhance the Performance of IEEE 802.15.4 LR-WPAN", Korea Information and Communications Society, Sept 2007.