

무선 센서네트워크에서 비동기식 MAC 프로토콜의 성능분석을 위한 분석적 모델

정성환^{1*} · 권태경²

¹삼성SDS주식회사 하이테크컨설팅그룹 / ²서울대학교 공과대학 컴퓨터공학부

Analytic Model for Performance Evaluation of Asynchronous MAC Protocol in Wireless Sensor Networks

Sung Hwan Jung¹ · Taekyoung Kwon²

¹SAMSUNG SDS, High Tech Consulting Group

²Seoul National University, School of Computer Science and Engineering

In this paper, under saturated traffic condition in a single-hop wireless sensor network, we present an analytic model that evaluates the performance of asynchronous MAC protocol which uses a preamble technique. Our model considers the impact of several important factors such as sleep cycle, the backoff mechanism and the number of contending nodes. After obtaining the cumulative backoff time of a sending node and expected delay of a receiving node, an iterative algorithm is presented for calculating the performance measures such as expected energy consumption usage per packet and latency. Simulation results show that the proposed analytic model can accurately estimate the performance measures under saturated traffic conditions.

Keywords: Sensor Networks, Asynchronous MAC, Preamble Technique, Backoff, Performance Analysis

1. 서론

무선 센서 네트워크의 프로토콜 설계에 있어서 가장 중요한 주제는 제한된 에너지 용량을 가진 센서들의 에너지 효율성을 증대시키는 것이다. 적은 에너지로 작동할 수 있는 가장 효과적인 방법 중의 하나는 센서들이 주기적으로 수면상태(sleep state)와 작동상태(awake state)를 반복하는 것이다. 주기적 수면 모드 방식(duty cycling)을 채택한 MAC(Medium Access Control) 프로토콜은 크게 동기식(synchronized)과 비동기식(asynchronous)의 두 방식으로 분류할 수 있다.

S-MAC(Ye *et al.*, 2004)과 T-MAC(Dam and Langendoen, 2003)과 같은 동기식 프로토콜은 노드가 언제 수면상태에 들어가고 다시 작동상태로 돌아오는 지에 대한 스케줄을 프레임 전송을 통해 미리 약속하여 작동하게 된다. B-MAC(Polastre *et al.*, 2004)과 WISEMAC(El-Hoiydi and Decotignie, 2005)과 같은 비

동기 방식의 프로토콜은 저전력 수신 기법을 이용하여 데이터를 송수신한다. 즉, 비동기식 전송 방식에서는 전송노드에 전송할 패킷이 있는 경우에, 수신노드의 수면 기간보다 더 긴 저전력의 프리앰블(preamble)을 보내게 된다. 수면 상태에서 깨어난 수신노드는 짧은 시간의 청취모드가 되는데 이 때 프리앰블을 수신하게 되면, 수면모드로 다시 들어가지 않고 프리앰블 후에 도착하는 데이터 패킷을 수신하기 위해 작동상태로 기다리게 된다. 비동기 방식은 노드간의 동기를 맞추기 위해 주기적으로 프레임을 송수신 해야 할 필요가 없어 동기식 방식에 비해 구현방식이 단순하고, 에너지 효율성이 더 좋은 것으로 평가되고 있다. <Figure 1>에서와 같이, 데이터를 전송하는 노드는 프리앰블 기법을 통해서 수신 노드가 데이터를 받기 위해 작동상태에 들어갈 것을 보장 받을 수 있다. 센서네트워크의 MAC 프로토콜에서 채택하는 패킷 backoff 기능은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 원리

본 연구는 기초기술연구회의 NAP 과제 지원으로 수행되었음.

* 연락저자 : 정성환, 135-918 삼성SDS주식회사 서울특별시 강남구 역삼2동 707-19, Fax : 02-873-6486, E-mail : jsh5810@gmail.com
2009년 3월 24일 접수; 2009년 9월 8일 수정본 접수; 2009년 11월 7일 게재 확정.

를 기반으로 하는 것이 일반적이다. CSMA/CA는 무선채널이 다른 사용자에게 의해서 사용 중이라고 판단될 때, 채널이 유휴해 질 때까지 기다린 후 바로 패킷을 전송하지 않고, 임의의 (random) 시간간격을 정하여 패킷 전송을 인위적으로 지연시킴으로써 다른 노드에서 전송되는 패킷과의 충돌 확률을 줄이는 기법이다. 센서네트워크에서는 에너지의 효율성을 고려하여 미리 정해진 backoff window 크기 내에서 임의의 시간값을 선택하여 backoff를 하는 가장 단순한 constant backoff window size/random backoff 방식을 일반적으로 채택하고 있다. CSMA/CA 기반의 backoff 기법에서는, backoff 도중에도 연속적으로 채널 상태를 모니터링하여, 채널이 다른 패킷 전송에 의해서 점유된 경우에 즉시로 backoff counter를 멈추고 일시 정지 상태 (frozen state)에 있다가 채널이 유휴에 지면, 다시 backoff counter를 줄여가게 된다(Bianchi, 2000). 이 방법은, 먼저 backoff를 시작한 패킷이 나중에 backoff를 시작한 패킷보다 채널을 점유할 확률을 높게 해주어 결과적으로 노드간의 형평성(fairness)을 보장해 준다.

수신노드가 무선채널이 유휴한지 아닌지를 정확하게 판단하는 것은 MAC 프로토콜 성능에 중요한 영향을 미치므로, 이에 대한 연구도 활발하게 이루어 졌다. B-MAC의 경우에는 CCA (Clear Channel Assessment) 라는 기법을 사용한다. CCA 기능은 무선 채널로부터 수신되는 신호를 샘플링(sampling)하여 무선 채널이 바쁜지, 즉 다른 노드에 의해서 사용되고 있는지 또는 유휴한지를 소프트웨어적으로 판단하는 기법이다. CCA에서는 채널이 유휴하다고 판단되는 시점. 예를 들면 패킷전송이 끝난 직후의 시점 등.의 수신 시그널 강도를 샘플링한다. 이러한 샘플 값들은 FIFO 큐에 저장된다. 그리고 큐에 저장된 값들의 중앙값(median)에 추정치의 로버스트니스(robustness)를 높여주기 위해서 α 의 감소를 갖는 exponential weighted moving average 값을 더하게 된다. 이 값이 추정된 잡음 최저값(noise floor estimate)이 된다. 잡음 최저값 추정치가 구해지면, 수신되는 무선 시그널의 강도를 모니터링하여 구해진 잡음 최저값보다 현저히 낮은 outlier가 측정되면 채널이 유휴하다고 평가하게 된다. 물론 이렇게 평가하는 기준에는 정확도를 높이기 위한 여러 가지 기법들이 더해 질 수도 있다.

현재까지 무선 센서네트워크의 MAC 프로토콜의 성능 분석에 대한 연구는 주로 시뮬레이션이나 실험 장치를 통해서 이루어 졌다(Polastre et al., 2004; Buettner et al., 2006; Stone and Colagrosso, 2007). 그러나, 이러한 방법은 다양한 트래픽 상황이나 네트워크 토폴로지에서 프로토콜의 성능을 이해하고 최

적 운영안을 찾는데 있어 시간적, 비용적 제약이 커진다는 한계를 가지고 있다. 따라서 MAC 프로토콜을 분석적으로 모델링하는 것은 운영자나 개발자 측면에서 적은 비용으로 프로토콜의 성능을 이해하고 최적의 운영 정책을 수립하는 데 중요한 기초 연구가 될 수 있다. 최근 동기식 방식의 대표적인 프로토콜인 S-MAC에 대해서 backoff 알고리즘을 반영한 분석적인 연구가 이루어졌다(Zhang et al., 2008). 그러나 비동기식 MAC 프로토콜에 대해서는 아직 backoff 알고리즘을 반영한 분석적인 연구가 없는 실정이다.

본 연구에서는 비동기식 방식의 MAC 프로토콜을 분석하기 위하여, 송신노드가 전송할 패킷을 항상 가지고 있는 포화 트래픽(saturated traffic condition)을 가정하여 backoff 작동방식, 수면주기, 송신노드의 수 등을 고려하여 각 노드의 에너지 사용량, 패킷 지연시간 등을 구할 수 있는 모델을 제시하였다.

무선 네트워크의 분석적 모델링이 궁극적으로 지향하는 바는 임의의 구조를 갖는 복수 홉(multi-hop) 네트워크를 실제 상황에 근접하게 모델링하는 것이라 할 수 있다. IEEE 802.11 DCF의 성능 분석의 경우에, 단순 홉(single hop), 포화 트래픽 하에서의 Bianchi(2000)의 연구가 Zhai et al.(2004)의 불포화 트래픽 상황에서의 모델링을 가능하게 한 기초 연구가 되었다. 그 후 이들 연구를 기초로 복수 홉, 포화트래픽 가정하에서의 성능분석이 Medepalli and Tobagi(2006) 등을 비롯한 여러 연구자들에 의해서 시도되고 있다. 이런 의미에서, 본 연구에서 무선 센서 네트워크의 단순 홉, 포화트래픽 상황을 모델링한 것은, 응용적인 측면보다는, 복수 홉 무선 센서 네트워크 모델링으로 가는 시초가 될 수 있다는 점에서 이론적인 의의가 더 크다고 할 수 있다.

2. 모델링

2.1 모델가정 및 기호의 정의

본 연구는 단순 홉을 갖는 무선 센서 네트워크를 분석 대상으로 한다. 그리고 동일한 통계적 특성을 갖는 N 개의 송신노드가 하나의 수신 노드에게 데이터를 보내기 위해서 경쟁하는 상황을 설정한다. 또한 수신노드가 패킷을 수신한 후 ACK(acknowledgement)를 보내며, backoff counter는 σ 를 기본 시간 단위로 하는 슬롯방식으로 작동된다고 가정한다. 송신노드는 항상 전송할 패킷을 가지고 있다는 포화 트래픽 상태(saturated traffic condition)를 가정한다. 수신노드는 패킷을 수신한 후 지체없이 즉시 수면모드로 들어가게 된다. 즉, 수신노드는 패킷 수신 간에 최소 1회 이상의 수면주기를 경험하게 된다.

시스템 변수는 다음과 같이 정의한다.

P_{tx} 전송에 소모되는 전력

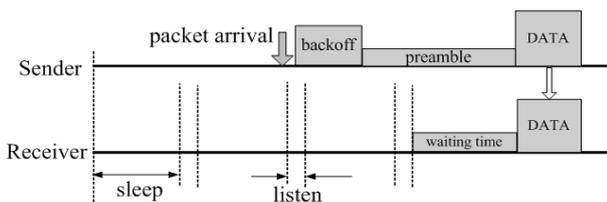


Figure 1. Preamble technique of asynchronous MAC protocol

P_{rx}	수신에 소모되는 전력
P_{sleep}	수면모드에서 소모되는 전력
P_{listen}	청취모드에서 소모되는 전력
$t_{preamble}$	프리앰블의 시간길이
t_{ACK}	ACK의 시간길이
$t_{timeout}$	ACK가 도착하지 않아 충돌이 발생했다고 판단할 때까지 기다리는 시간길이
t_{packet}	패킷수신 및 전송의 시간길이
t_{sleep}	수면모드의 길이
t_{listen}	청취모드의 길이
$t_{sleepcycle}$	수면, 청취모드 한 주기의 길이($= t_{sleep} + t_{listen}$)
W_I	initial backoff window 크기
W_C	congestion backoff window 크기
σ	window의 단위 slot 길이

본 연구에서 모델링을 위하여 추가적으로 제안한 변수는 다음과 같다.

t_{b1}	initial backoff의 지속기간
t_{b2}	congestion backoff의 지속기간
T_b	패킷을 전송하기까지 누적된 총 backoff 기간
$t_{elapsed}$	수신노드가 수면모드에 들어간 시점부터 송신노드에서 프리앰블을 보내기 시작한 시점까지의 경과시간
t_{wait}	수신노드가 수면모드에서 깨어난 후 프리앰블이 끝날 때까지 기다리는 시간
$T_{sleep}(T_{listen})$	수신노드가 패킷을 수신하기까지 $t_{sleep}(t_{listen})$ 의 누적값
$T_{wait}(T_{sleepcycle})$	수신노드가 패킷을 수신하기까지 $t_{wait}(t_{sleepcycle})$ 의 누적값
t_{succ}	패킷전송을 위해서 필요한 시간($= t_{preamble} + t_{packet} + t_{ACK}$)
t_{col}	충돌로 인해서 전송이 실패할 때 소요되는 시간($= t_{preamble} + t_{packet} + t_{timeout}$)
$n_{sleepcycle}$	패킷을 수신하기까지 경험하는 연속적인 sleepcycle의 개수
$n_{collision}$	패킷을 수신할 때까지 경험하는 충돌의 회수
p	관측노드의 backoff 한 슬롯 동안 다른 노드에서 패킷을 전송하여 채널이 바쁠 확률
p_{succ}	관측노드의 backoff 한 슬롯 동안 다른 노드 중 오직 하나의 노드에서 패킷을 전송하여 채널이 바쁠 확률
p_{col}	관측노드의 backoff 한 슬롯 동안 두 개 이상의 다른 노드에서 패킷을 전송하는 충돌로 인해서 채널이 바쁠 확률
p_{tr}	임의의 시간에 전송노드에서 패킷전송을

	시작할 확률
p_{cb}	Initial backoff 동안 다른 노드의 패킷전송에 의해서 채널이 바빠져 congestion backoff로 넘어가게 될 확률
p_{succ}^{slot}	수신노드의 수면모드 한 슬롯 동안 오직 하나의 송신노드에서 송신을 시작하여 채널이 바쁠 확률
p_{col}^{slot}	수신노드의 수면모드 한 슬롯 동안 두 개 이상의 송신노드에서 전송을 시작하여 채널이 바쁠 확률
p_{emp}^{slot}	수신노드의 수면모드 한 슬롯 동안 모든 송신노드에서 송신을 하지 않아서 채널이 유희할 확률
n_{empty}	수신노드의 수면모드 동안에 송신노드의 전송이 없어 채널이 연속적으로 유희한 슬롯의 개수
t_{empty}	수신노드의 수면모드 동안에 송신노드의 전송이 없어 채널이 연속적으로 유희할 시간

프로토콜이 성립되기 위해서는 $t_{preamble} > t_{sleep}$ 성립해야 함을 유지하자. 본 연구에서는 $W_I \cdot \sigma < W_C \cdot \sigma < t_{sleep}$ 이 항상 성립함을 가정한다. 즉, 송신노드의 backoff 기간은 수신노드의 수면기간보다 길지 않으므로, 수신노드의 수면기간동안 반드시 하나 이상의 송신노드에서 전송이 시작되게 된다. 수신노드가 CCA 등의 알고리즘을 통해 채널이 바쁜 상태에 있고 판단하면 신호를 디코딩하기 시작한다. 이 때 충돌이 발생한 채널 신호의 경우에는 디코딩한 값이 garbage가 나오게 되어, 채널이 충돌된 것을 알게 된다. garbage 값이 검출되면 노드는 계속 패킷을 받아 디코딩하지 않고, 즉시 수면 모드로 들어가게 된다. 본 논문에서는 채널이 충돌한 상태인지를 발견하는 시간은 무시할 수 있을 정도로 짧다고 가정하여 이 시간을 모델링에 반영하지는 않았다.

2.2 Backoff 작동방식 및 모델링

본 연구에서 채택한 backoff 작동방식은 다음과 같다. 전송노드에서 전송할 패킷이 들어오면 먼저 $[0, W_I - 1]$ 값 중에서 랜덤하게 정수값을 취하여 그 기간동안 initial backoff에 들어가게 된다. Initial backoff 동안, 하나 이상의 다른 전송노드에서 패킷을 전송하여 채널이 바쁜상태(busy state)인 것이 감지되면, initial backoff를 중단하고 즉시로 congestion backoff에 들어가게 된다. Congestion backoff의 기간도 $[0, W_C - 1]$ 값중에서 임의의 정수값을 선택하는 단순 random backoff 방식이다. Congestion backoff 동안에 채널이 바쁜 것이 감지되면 backoff counter를 줄이지 않고 일시 정지 상태(frozen state)로 있게 되고, 채널이 유희해지면 다시 backoff counter를 줄이기 시작한다. 일시 정지 상태를 두는 이유는 서론에서 전술한 바와 같이

먼저 backoff를 시작한 노드가 나중에 backoff를 시작한 노드보다 더 먼저 전송할 확률을 높임으로 노드간의 형평성(fairness)을 보장하기 위한 것이다. Backoff counter가 0이 되면 패킷 전송을 시작한다. 이 때 만약 충돌이 일어나면 동일한 패킷에 대하여 initial backoff 부터 다시 backoff 절차를 시작하게 된다. 이와 같은 backoff 정책하에서 전송노드의 backoff 과정을 전송노드의 backoff 모드와 backoff counter 값을 상태변수로 하는 이산시간 Markov chain으로 나타낼 수 있으며, 그 상태전이도는 <Figure 2>와 같다.

<Figure 2>에서 backoff의 상태를 (i, j) 로 나타내고 그 상태를 나타내는 확률값을 $p_{(i,j)}$ 로 표시하기로 하자. $i=1$ 은 initial backoff 상태를, $i=2$ 는 congestion backoff 상태를 각각 나타낸다. $j=0, \dots, \text{Max}[W_I-1, W_C-1]$ 는 backoff counter 값을 의미한다.

이제 backoff 상태를 나타내기 위한 기본확률 값인 p , p_{tr} , p_s 그리고 p 값을 구하기로 하자. <Figure 2>를 이용하여 $p_{(i,j)}$ 의 관계식을 유도하면 다음과 같다. 먼저 $i=1$ 인 경우의 관계식은 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$p_{(1,j)} = (1-p)p_{(1,j+1)} + \frac{1}{W_I} \{(1-p)p_{(1,0)} + p_{(2,0)}\}, \quad (1)$$

$$j=0, \dots, W_I-2$$

$$p_{(1, W_I-1)} = \frac{1}{W_I} \{(1-p)p_{(1,0)} + p_{(2,0)}\} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 정리하면 식 (3)과 같이 된다.

$$p_{(1,j)} = \frac{1}{p} \{1 - (1-p)^{W_I-j}\} \frac{1}{W_I} \{(1-p)p_{(1,0)} + p_{(2,0)}\}, \quad (3)$$

$$j=0, \dots, W_I-1$$

$i=2$ 인 경우는 식 (4)와 같이 표시된다.

$$p_{(2,j)} = \left(\frac{W_C-j}{W_C} \right) \left\{ \sum_{i=0}^{W_I-1} p_{(1,i)} \right\} p, \quad (4)$$

$$j=0, \dots, W_C-1$$

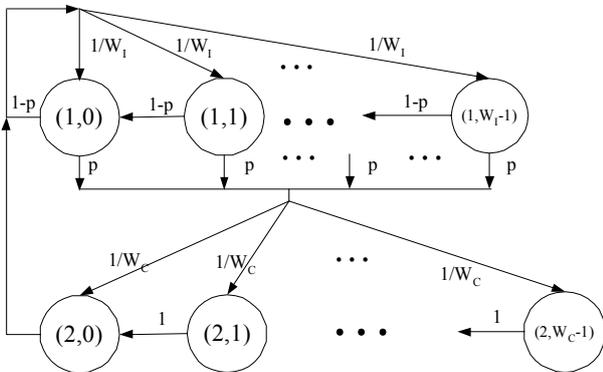


Figure 2. Transition diagram of backoff state

$$\sum_{j=0}^{W_I-1} p_{(1,j)} + \sum_{j=0}^{W_C-1} p_{(2,j)} = 1 \quad (5)$$

식 (3), 식 (4) 그리고 $p_{(i,j)}$ 가 확률이 될 조건(normality condition)인 식 (5)를 연립하여 풀면 식 (6), 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$p_{(2,0)} = \frac{2p}{p(W_C+1)+2} \quad (6)$$

$$p_{(1,0)} = \frac{2p\{1-(1-p)^{W_I}\}}{\{p(W_C+1)+2\}[pW_I-(1-p)\{1-(1-p)^{W_I}\}]} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)를 이용하여 임의의 시점에 노드가 패킷을 전송할 확률인 p_{tr} 은 다음과 같이 계산된다.

$$p_{tr} = p_{(1,0)} + p_{(2,0)} = \frac{2p^2 [W_I + \{1 - (1-p)^{W_I}\}]}{\{p(W_C+1)+2\}[pW_I - (1-p)\{1 - (1-p)^{W_I}\}]} \quad (8)$$

또한, p 는 관측노드를 제외한 나머지 $N-1$ 개의 노드에서 모두 패킷을 전송하지 않을 사건의 여사건의 확률이 됨으로 다음과 같이 계산된다.

$$p = 1 - (1-p_{tr})^{N-1} \quad (9)$$

p_{succ} 는 관측노드를 제외한 나머지 $N-1$ 개의 노드 중 오직 하나의 노드에서만 패킷전송이 일어나는 사건의 확률이므로 식 (10)과 같이 계산된다.

$$p_{succ} = (N-1)p_{tr}(1-p_{tr})^{N-2} \quad (10)$$

p_{col} 은 $p_{col} + p_{succ} = p$ 라는 성질을 이용하여 계산할 수 있다.

2.3 송신노드의 누적 backoff 시간

본 절에서는 송신노드가 패킷전송에 성공할 때까지 누적된 backoff의 시간 길이 T_b 의 기대값을 구하고자 한다. 제한된 backoff 작동방식에 의하면 $E[T_b]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[T_b] = \{E[t_{b1}] + p_{cb} \cdot E[t_{b2}]\}(1-p)^{-1} \quad (11)$$

식 (1)에서 $(1-p)^{-1}$ 항은 congestion backoff counter가 0이 되어 패킷 전송을 시작했을 때, 다른 노드에서도 패킷이 전송이 일어나 충돌이 발생하게 됨으로 backoff 절차를 반복하게 될 기대회수로 p 를 성공확률을 갖는 기하분포의 평균이다. 식 (11)에서 $E[t_{b1}]$ 의 값은 다음과 같이 계산된다.

$$E[t_{b1}] = 0 \cdot \frac{\sigma}{W_I} + \sum_{j=1}^{W_I-1} j \cdot \left[(W_I - j - 1)(1-p)^j p + (1-p)^j \right] \frac{\sigma}{W_I} \\ = \sum_{j=1}^{W_I-1} j \cdot (1-p)^j [(W_I - j - 1)p + 1] \frac{\sigma}{W_I} \quad (12)$$

또한 p_{cb} 는 initial backoff 동안 채널이 바쁜 사건이 발생하지 않을 사건의 여사건의 확률로서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p_{cb} = 1 - \frac{1}{W_I} \frac{(1-p)}{p} \{1 - (1-p)^{W_I}\} \quad (13)$$

$E[t_{b2}]$ 는 다음의 식으로 계산된다.

$$E[t_{b2}] = \frac{1}{2} (W_C - 1) \left[\sigma + \frac{p_{succ}}{(1 - W_I^{-1})} t_{succ} + p_{col} \cdot t_{col} \right] \quad (14)$$

식 (14)에서 우측의 대괄호 부분은 backoff 도중 counter가 하나의 슬롯에 머무르게 될 평균 시간을 나타낸다. 구체적으로 $\frac{p_{succ}}{(1 - W_I^{-1})}$ 항은 식 (15)를 계산한 값으로서 다른 노드가 패킷 전송을 성공한 이후에 연속적으로 패킷전송에 성공할 기대 회수를 의미하는 것으로 포화 트래픽 가정하에서만 의미있는 식이다. 즉, 한 슬롯 counter에 머무는 동안 다른 노드의 연속적인 전송 성공에 의해서 채널이 바빠질 기대회수를 의미한다.

$$\frac{p_{succ}}{(1 - W_I^{-1})} = p_{succ} \left\{ 1 \cdot \left(1 - \frac{1}{W_I}\right) + 2 \left(\frac{1}{W_I}\right) \left(1 - \frac{1}{W_I}\right) + 3 \left(\frac{1}{W_I}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{W_I}\right) + \dots \right\} \quad (15)$$

또한 식 (14)에서 p_{col} 은 한 슬롯에 머무르는 동안 다른 노드 간의 충돌에 의해서 채널이 바빠질 기대회수의 근사값이다.

2.4 수신노드의 수면회수 및 대기시간

본 절에서는 수신노드가 패킷을 받기까지 연속적으로 수면 주기에 들어갈 회수인 $n_{sleepcycle}$ 과 수신노드가 수면모드에 들어간 시점부터 송신노드에서 프리앰블을 보내기 시작한 시점까지의 경과시간인 $t_{elapsed}$, 그리고 수신노드가 수면모드에서 깨어난 후 프리앰블이 끝날 때까지 기다리는 시간 t_{wait} 의 기대값을 구하고자 한다.

먼저 $n_{sleepcycle}$ 을 구해보자. 프로토콜의 성립조건인 $W_I \cdot \sigma < W_C \cdot \sigma < t_{sleep}$ 은 항상 만족하며 또한 수신노드는 채널모니터링을 통해 채널이 성공적 전송에 의해서 바쁜상태에 있는지, 충돌에 의해서 바쁜상태에 있는지 구별할 수 있음을 주지하자. 만약 송신노드 간에 충돌이 발생할 확률이 0이라면, 송신노드의 backoff counter가 0이 되는 시점이 수신노드의 한 수면기간 내에 존재하게 되고, 따라서 수면기간 내에 전송이 반드시 일어나므로 $n_{sleepcycle} = 1$ 이 성립한다. 즉, 수면모드에서 깨어난 수신노드는 항상 채널이 바쁜상태임을 감지하고 다시 수면모드에 들어가지 않는다. 반면에 충돌이 발생할 확률이 존재한다면 $n_{sleepcycle} > 1$ 이 된다. 왜냐하면, 송신노드간의 충돌로 인해서 채널이 바쁜 경우, 수면모드에서 깨어난 수신노드는 충돌이 일어났음을 알고 다시 수면모드로 들어감으로 $n_{sleepcycle} \geq 2$ 인 경우가 발생하기 때문이다. 따라서, $n_{sleepcycle}$ 의 기대값은 충돌이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우로 나누어 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E[n_{sleepcycle}] = (1 - p_{col}^{slot}) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \Pr(n_{empty} = k) \cdot \left[(k \cdot \sigma + t_{col}) / t_{sleepcycle} \right] \quad (16)$$

$$\approx (1 - p_{col}^{slot}) \cdot 1 + p_{col}^{slot} \cdot \left[(E[t_{empty}] + t_{succ}) / t_{sleepcycle} \right] \quad (17)$$

식 (17)은 식 (16)의 무한급수의 계산 복잡도를 낮추기 위한 근사식으로서 충돌이 일어날 때까지 경과 시간값을 평균값인

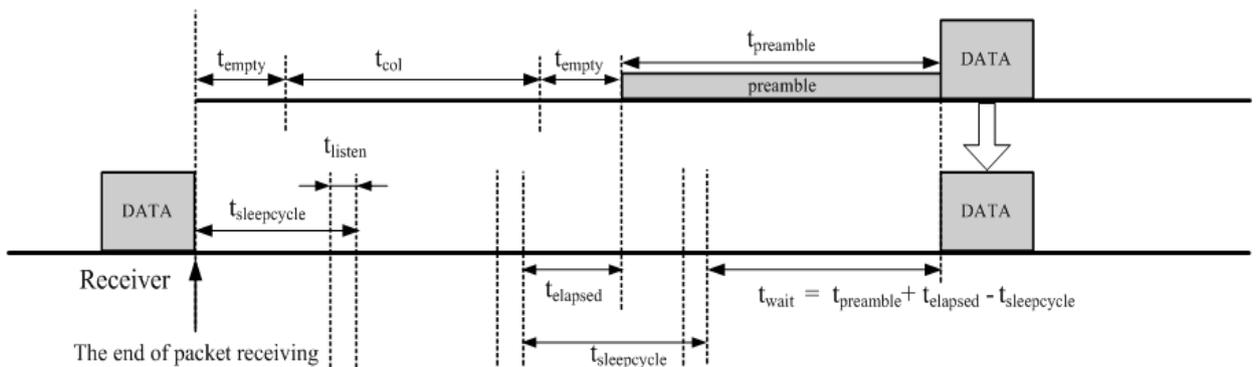


Figure 3. The relationship between $t_{elapsed}$ and t_{wait}

$E[t_{empty}]$ 으로 대체한 것이다.

본 연구에서는 계산상의 복잡성을 줄이기 위해서, <Figure 3>에서와 같이 성공적 전송이 있기 전에 충돌이 발생할 확률은 한 번 이하라고 가정한다. 실제로 실험을 통하여 충돌이 연속적으로 두 번 이상 발생할 확률값이 전체 성능에 영향을 줄 정도로 크지 않음을 확인할 수 있었다.

식 (16)에서 $\Pr(n_{empty} = k)$ 값은 p_{emp}^{slot} 를 파라미터로 하는 기하분포로서 식 (18)과 같이 계산된다.

$$\Pr(n_{empty} = k) = (p_{emp}^{slot})^k (1 - p_{emp}^{slot}) \quad (18)$$

$$E[t_{empty}] = \left(\frac{1}{1 - p_{emp}^{slot}} \right) \sigma \quad (19)$$

수신노드의 수면기간 동안 충돌이 발생할 확수가 한 번 이하라고 가정하고, $t_{elapsed}$ 의 기대값을 계산하면 다음과 같다.

$$E[t_{elapsed}] = p_{col}^{slot} \cdot E[t_{empty}] \quad (20)$$

$$+ (1 - p_{col}^{slot}) \left[\sum_{k=1}^{\infty} \Pr(n_{empty} = k) \left\{ (k \cdot \sigma + t_{col}) - \left\lfloor \frac{k \cdot \sigma + t_{col}}{t_{sleepcycle}} \right\rfloor t_{sleepcycle} \right\} + E[t_{empty}] \right]$$

$$\approx E[t_{empty}] + (1 - p_{col}^{slot}) \quad (21)$$

최종적으로 t_{wait} 의 기대값은 <Figure 3>에서 확인할 수 있듯이 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$E[t_{wait}] = t_{preamble} + E[t_{elapsed}] - t_{sleepcycle} \quad (22)$$

3. 성능척도의 계산

MAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서는 다음의 척도들을 제안한다.

- E_{tx} 전송노드에서 하나의 패킷을 전송하는데 소모되는 평균 에너지량
- E_{rx} 수신노드에서 하나의 패킷을 수신하는데 소모되는 평균 에너지량
- Lat 전송노드에서 수신노드까지 전달되는데 걸리는 평균 지연시간

E_{tx} 와 E_{rx} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_{tx} = P_{listen} \cdot E[T_b] + P_{tx} \cdot (t_{preamble} + t_{packet}) + P_{rx} \cdot t_{ACK} \quad (23)$$

$$E_{rx} = P_{rx} \cdot t_{packet} + P_{listen} \cdot E[T_{listen}] + P_{sleep} \cdot E[T_{sleep}] + P_{tx} \cdot t_{ACK} \quad (24)$$

식 (24)에서 $E[T_{listen}]$ 와 $E[T_{sleep}]$ 는 수신노드가 새로운 패킷을 수신하기까지 누적 청취기간과 수면기간을 각각 나타내는 것으로 다음과 같이 계산된다.

$$E[T_{listen}] = t_{listen} \cdot E[n_{sleepcycle}] + E[t_{wait}] \quad (25)$$

$$E[T_{sleep}] = t_{sleep} \cdot E[n_{sleepcycle}] \quad (26)$$

패킷이 송신노드에 수신노드에 도착할 때까지 소요되는 평균시간 (Lat)은 패킷의 누적 backoff 시간과 실제 전송에 필요한 시간의 합이 된다.

$$Lat = E[T_b] + t_{succ} \quad (27)$$

본 장에서 제시한 성능척도들을 계산하기 위해서는 2장에서 제시한 송신 및 수신노드의 backoff 상태를 나타내는 기본 확률값들이 먼저 주어져야 한다. 성능척도들을 계산하기 위한 반복적인 계산알고리즘을 다음과 같이 제시한다.

- Step 1 : Initialize p
- Step 2 : Calculate p_{tr} , p_{succ} and p_{col}
- Step 3 : Calculate $E[T_b]$
- Step 4 : Update p_{succ}^{slot} , p_{col}^{slot} , p_{emp}^{slot} and calculate $E[n_{sleepcycle}]$ and $E[t_{wait}]$
- Step 5 : Updated p . If p converges within threshold then go to Step 6 otherwise go to Step 2
- Step 6 : Calculate E_{tx} , E_{rx} , and Lat

4. 실험 예제

본 장에서는 제안된 모델의 정확성을 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해서 검증한다. 실험에 필요한 설정값은 Polastre *et al.* (2004) and Buettner *et al.* (2006)의 연구를 참조하여 Table 1에 정리하였다. Initial backoff window 크기는 $W_I = 15$, congestion backoff window 크기는 $W_C = 30$ 으로 각각 설정하였다. 패킷 전송을 위해 경쟁하는 전송노드의 개수를 증가시키며, 모델에 의한 계산값과 시뮬레이션을 통해 관측된 값을 도시하였다.

모델 검증을 위한 시뮬레이션은 Event based 방식을 선택하였다. 즉, 시뮬레이션이 시작되면 System Clock을 Event가 발생하는 시간에 따라 증가시키면서, 측정변수들의 값을 update 하

Table 1. 실험 설정값

변수	값
P_{tx}	86.2 mW
P_{rx}	96.6 mW
P_{sleep}	0.0183 mW
P_{lisetn}	96.6 ms
$t_{preamble}$	48 ms
t_{packet}	15 ms
t_{ACK}	2 ms
$t_{timeout}$	3 ms
σ	1 ms
t_{listen}	2 ms
t_{sleep}	40 ms

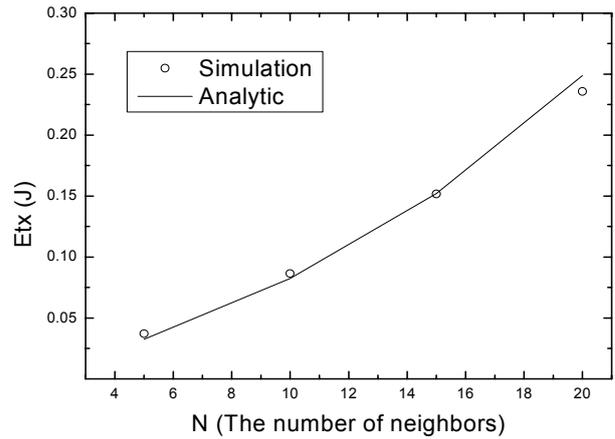


Figure 5. E_{tx} vs. the number of sending neighbors

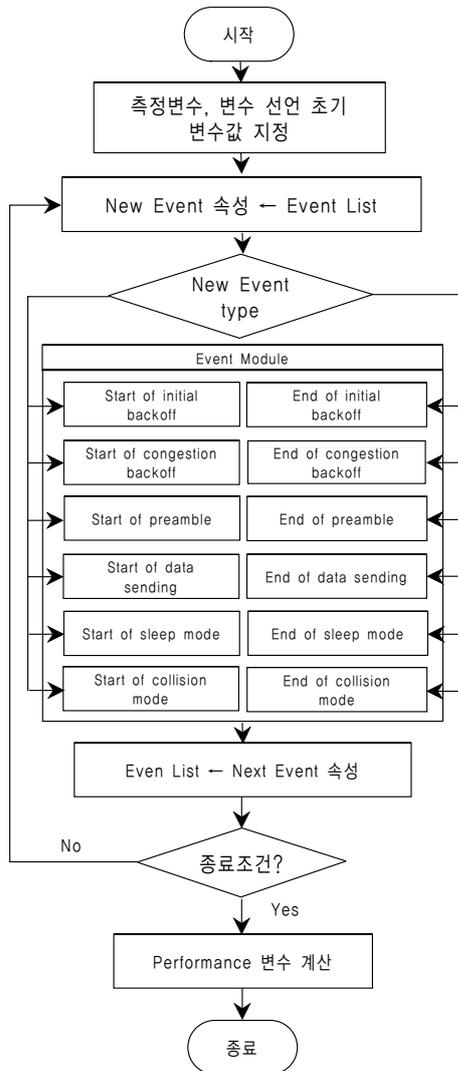


Figure 4. Simulation Flow Chart

는 것이다. Event Type은 송신노드, 수신노드, 채널상태에 따라서 <Figure 4>에서 보는 바와 같이 총 12개가 존재한다. 시뮬레이션이 시작되면, Event List에서 첫 번째 위치한 Event 속성 (Event 시작 시점이 가장 빠른 Event)을 New Event 속성으로 받아온다. Event 속성에는 Event Type, Event 발생 Node, Event 시작시점, Event 종료시점 등이 포함된다. New Event 속성의 Event Type에 따라 해당 모듈로 이동한다. 각 Event Module에서는 Event 특성에 맞게 여러 측정변수나, 지시변수들을 update 해주고, Next Event 속성을 생성한다. 생성된 Next Event 속성은 Event List에 시간 순서에 따라 적절한 위치에 삽입된다. 이러한 과정을 종료 조건을 만족시킬 때까지 반복하게 된다. 시뮬레이션 종료 조건은 System Clock 값이나 전송된 패킷의 개수 등을 선택할 수 있는데 본 실험에서는 전송된 패킷의 수가 10,000 번을 넘을 때로 설정하여 주었다. 본 시뮬레이션은 Wolfram Mathematica 6.0으로 코딩하였다.

<Figure 5>는 경쟁하는 송신노드 개수의 증가에 따른 E_{tx} 값의 변화를 도기한 것이다. 제안된 모델과 시뮬레이션 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 포화 트래픽 가정하에 패킷 하나를 보내는데 필요한 에너지는 경쟁하는 송신노드의 수가 많아질수록 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. 식 (23)에서 알 수 있는 것처럼 E_{tx} 값은 $E[T_b]$ 값의 변화에 정비례한다.

<Figure 6>은 경쟁하는 송신노드 개수의 증가에 따른 E_{rx} 값의 변화를 도기한 것이다. 제안된 모델과 시뮬레이션 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 포화 트래픽 가정하에서 패킷 하나를 수신하는데 필요한 에너지는 경쟁하는 송신노드의 수에 크게 관계가 없음을 알 수 있다. 식 (24)에서 확인할 수 있듯이 E_{rx} 의 값은 $E[T_{listen}]$ 과 $E[T_{sleep}]$ 의 변화에 직접적인 영향을 받는데 $P_{rx} \gg P_{sleep}$ 이므로 $E[T_{sleep}]$ 보다 $E[T_{listen}]$ 의 변화가 E_{rx} 의 변화에 절대적인 영향을 준다는 것을 알 수 있다. $E[T_{listen}]$ 의 값은 식 (25)에서 확인할 수 있듯이 $E[n_{sleepcycle}]$ 과 $E[t_{wait}]$ 의 값의 변화에 영향을 받는데, 경쟁노드수가 증가할수록 충돌이 일어날 확률이 커짐으로 $E[n_{sleepcycle}]$ 의 값은 증가

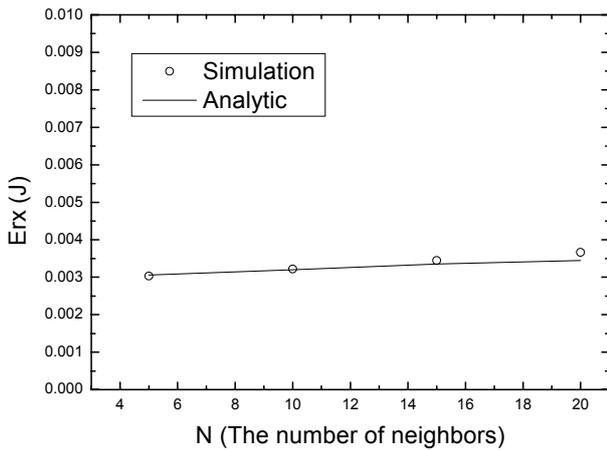
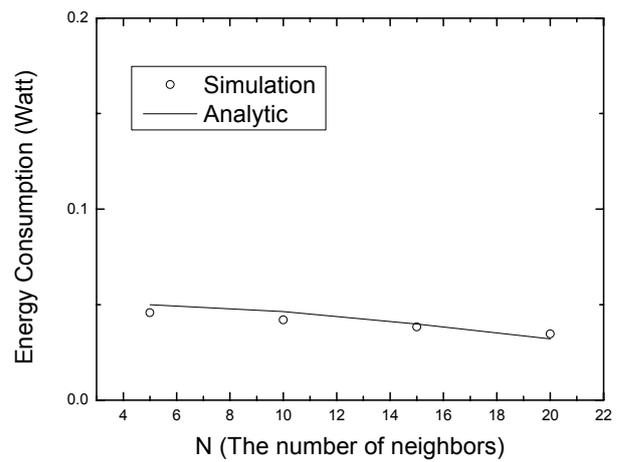
Figure 6. E_{rx} vs. the number of sending neighbors

Figure 9. Energy Consumption of Receiver

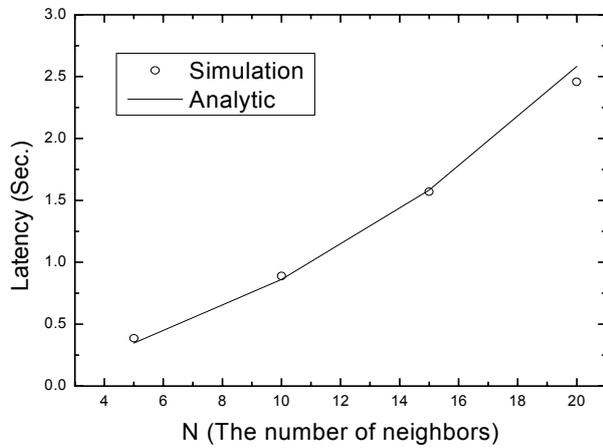


Figure 7. Latency vs. the number of sending neighbors

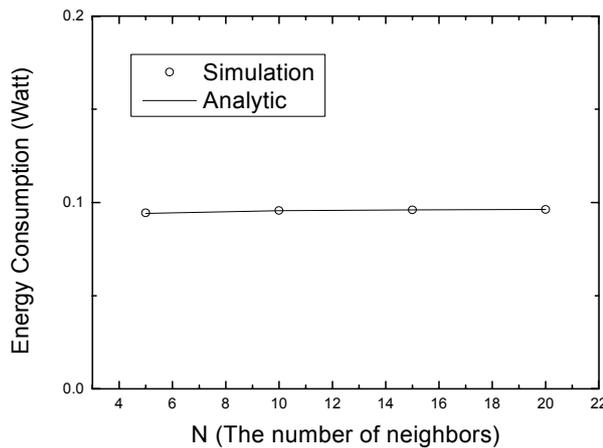


Figure 8. Energy Consumption of Sender

하고 $E[t_{wait}]$ 의 값은 경쟁노드의 수가 증가할수록 짧아지게 되어 서로 상충관계가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 설정한 설정값 조건에서는 경쟁노드 수 증가에 $E[n_{sleepcycle}]$ 과 $E[t_{wait}]$ 의 증감이 서로 상충되어 E_{rx} 에 미치는 변화의 기여도가 크

지 않음을 알 수 있다.

<Figure 7>은 경쟁하는 송신노드 개수의 증가에 따른 Lat 값의 변화를 도시한 것이다. 식 (27)에서 알 수 있듯이, t_{suc} 값은 상수이므로, 포화 트래픽 가정하에서 Lat 값에는 $E[T_b]$ 가 유일하게 영향을 주는 것을 알 수 있다. 포화 트래픽이 아닌 불포화 트래픽 상태가 되면, 패킷의 대기시간(queueing delay)이 Lat 에 추가적으로 영향을 주게 될 것임을 예상할 수 있다.

<Figure 8>과 <Figure 9>는 송신노드와 수신노드에서 단위 시간당 소모되는 에너지를 도시한 것이다.

송신노드의 경우에는 시간당 에너지 사용량이 경쟁하는 노드 수에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 경쟁하는 노드의 수가 증가하면, 다른 시간 요인에는 변화가 없고 오직 backoff 시간만 길어지기 때문에, backoff 길이가 증가한다고 해도 단위 시간 당 소모되는 에너지량에는 변화가 없기 때문이다. 수신노드의 경우에는 경쟁하는 송신노드의 수가 증가할수록 에너지 사용량이 소폭 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 경쟁하는 노드의 수가 증가하면, 송신노드간 충돌 회수의 증가로 인해 $E[T_{listen}]$ 와 $E[T_{sleep}]$ 값이 모두 증가하는데, 이 때, 에너지 사용률이 작은 $E[T_{sleep}]$ 의 증가량이 $E[T_{listen}]$ 보다 더 크기 때문에 해석될 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구 방향

본 연구에서는 포화 트래픽 상황에서 프리앰블 기법을 사용하는 비동기식 무선 MAC 프로토콜의 성능을 평가할 수 있는 분석적인 모델을 제안하였다. 구체적으로 backoff 알고리즘, 수면 노드의 수면주기 등을 고려하여 패킷 전송노드의 개수에 따른 송신노드의 평균 backoff 지연시간, 수신노드의 평균 수면주기회수, 패킷 수신을 위한 평균 대기시간을 구하였으며, 이를 이용하여 전송 및 수신 노드에서의 단위 패킷당 에너지 사용량과 latency를 성능척도로서 계산하는 반복적인 알고리

증을 제시하였다. 실험결과를 통하여 본 연구에서 제시된 모델에 의한 추정값이 실제값과 잘 일치됨을 확인할 수 있었다.

본 연구는 시뮬레이션이나 실험 장치를 통한 연구에 비해, 적은 비용으로 비동기식 MAC 프로토콜의 성능을 평가할 수 있게 해 주며, 이를 통해서 프로토콜의 최적 운영정책 수립에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 포화 트래픽 상황을 가정하여, 일반적인 트래픽 상황을 반영하지 못하는 한계를 가지고 있으나 비동기식 MAC 프로토콜에 대한 분석적인 연구가 없는 상황에서 불포화 트래픽 상황의 모델 연구를 위한 선행 연구라고 할 수 있다. 본 연구의 추후 연구로서 단순 홑, 불포화 트래픽 상황 하에서 연구가 이루어지면, 다음 단계로는 선형(linear) 홑 구조의 연구가 이루어져야 한다. 그것이 가능해 진다면, 여러 선형 홑의 결합으로 이루어진 트리(tree) 구조를 갖는 복수 홑 네트워크의 성능 분석으로 진화해 갈 수 있을 것으로 생각된다. 그러나, 복수 홑 모델링의 경우는 일반적인 대기행렬 네트워크 문제의 복잡성으로 인해서, 각 노드의 서비스 분포를 지수분포로 가정을 허용하지 않는 한, 부득이 여러 가정을 포함시키는 근사적인 방법(approximated approach)으로 연구가 진행되어야 할 것이다. 그래서 실제 네트워크 상황에 맞도록 가정들을 단계적으로 완화해 나가는 방향으로 연구가 진행될 것으로 예상된다.

참고문헌

- Buettner, M. and G. V. Yee, *et al.* (2006), X-MAC : A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks, '06 : *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, Boulder, Colorado, USA : ACM Press.
- Dam, T. van and Langendoen, K. (2003), An Adaptive Energy-efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 171-180.
- El-Hoiydi, A. and Decotignie, J. (2005), Low Power Down-link MAC Protocols for Infrastructure Wireless Sensor Networks, *ACM Mobile Networks and Applications*, **10**(5), 675-690.
- Gross, D and Harris, C.M. *Fundamentals of Queuing Theory*, 2nd ed. (1985), *John Wiley & Sons*, New York.
- G. Bianchi (2000), Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **18**(3), 535-547.
- Medepalli, K. Tobagi, F. A. (2006), Towards Performance Modeling of IEEE 802.11 Based Wireless Networks : A Unified Framework and Its Applications, INFOCOM 2006, 25th IEEE International Conference on Computer Communications.
- Polastre, J., J. Hill, *et al.* (2004), Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, New York, NY, USA : ACM Press, 95-107.
- Ross, Sheldon M., *Stochastic Processes*, 2nd ed. (1996), *John Wiley & Sons, Inc.*
- Stone, K. and M. Colagrosso (2007), Efficient Duty Cycling through Prediction and Sampling in Wireless Sensor networks, *Wireless Communications & Mobile Computing*, **7**, 1087- 1102.
- Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D. (2004), Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *ACM Transactions on Networking*, **12**(3), 493-500.
- Zhang, Y., He, C., and Jiang, L. (2008), Performance Analysis of S-MAC Protocol under Unsaturated Conditions, *IEEE Communications Letters*, **12**(3), 210- 212.
- Zhai, Hongqiang, Kwon, Younggoo and Fang, Yuguang (2004), Performance Analysis of IEEE 802.11 MAC Protocols in Wireless LANs, *Wireless Communications & Mobile Computing*, **4**, 917-931.