DBpia

논문번호 12-37B-09-04

한국통신학회논문지 '12-09 Vol.37B No.09
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2012.37B.9.750

IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA기반 무선 센서 네트워크의 효율적인 충돌 해결 기법

정 경 학◆, 서 영 주°

An Efficient Collision Resolution Method in Wireless Sensor Networks Based on IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA

Kyoung-Hak Jung◆, Young-Joo Suh°

요 약

본 논문은 IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA기반 무선센서네트워크의 성능 향상을 위한 충돌 해결 문제를 다룬다. 기존 연구에서는 센서 노드의 Backoff Exponent (BE) 값의 설정이나 Backoff Period (BP)를 조절하여 센서 노드 간 충돌을 줄이고자 하였다. 기존 논문의 해결책과 달리 본 논문에서 제안하는 기법은 Preamble Address (PA)를 이용해 충돌의 가능성을 제거함으로써 시스템 전체 throughput을 향상시킬 뿐만 아니라 동시에 센서 노드의 소모 에너지를 효율적으로 절감하는 효과를 얻는다. 이를 위해 제안 기법에서는 노드가 data 패킷을 전송하기 전, PA 경쟁 단계를 수행함으로써 오직 한 노드만이 패킷을 전송하도록 한다. 실험 결과를 통해 제안 기법이 보다 효율적으로 에너지를 소모함과 동시에 시스템의 throughput을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : IEEE 802.15.4, Zigbee, Energy, Collision resolution

ABSTRACT

This paper addresses the collision resolution issue to enhance the performance of wireless sensor networks based on IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA. Some solutions in existing work try to solve this issue by adjusting Backoff Exponent (BE) value or Backoff Period (BP). In contrast to the existing solutions, the proposed scheme in this paper aims at providing high system throughput, but also achieving efficient energy consumption of sensor nodes by using Preamble Address (PA). For this, in the proposed scheme, only one sensor node begins data packet transmission by performing PA contention phase with other nodes before sending each data packet. Our simulation results show that the proposed scheme outperforms existing algorithms in terms of energy consumption and throughput.

Ⅰ. 서 론

IEEE 802.15.4 LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network)은 저속, 저전력 통신에 중점을 둔 PHY와 MAC 계층에 대한 표준으로써, 리소스에 제약이 많은 무선센서네트워크 응용에 적합하다. 따라서 비록 이동통신망과 무선랜 등 현재 다양한 무선 접속 기술들이 발전하고 있지만 초저전력 통신이 가능하다는 장점으로 인해 군사, 의료 장비 등 다양한 분야에 널리 쓰일 것으로 전망된다.

※ 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업과 (2011-0026371) 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었음 (2011-0029034).

◆ 주저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 모바일 네트워킹 연구실, khjung@monet.postech.ac.kr, 정회원

° 교신저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과/정보전자융합공학부 yjsuh@postech.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS-2012-04-215, 접수일자 : 2012년 4월 24일, 최종논문접수일자 : 2012년 8월 7일

www.dbpia.co.kr

IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA는 코디네이터 (coordinator)가 주기적으로 전송하는 비콘 프레임 (beacon frame)에 의해 구분되는 슈퍼프레임 (superframe) 구조를 사용한다[1]. 각 슈퍼프레임 구간은 활성 (active) 구간과 비활성 (inactive) 구간으로 나누어지고, 활성 구간은 다시 경쟁 기반의 CAP (Contention Access Period) 구간과 CFP (Contention Free Period) 구간으로 나누어진다. 특히 CAP 구간에서는 여러 센서 노드가 경쟁을 통해 통신을 수행하는데 불필요하게 큰 백오프 카운터 값이 사용될 경우 채널의 이용률이 낮아져 네트워크 throughput이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다. 또한 두 개 이상의 센서 노드가 동시에 전송을 시도하는 경우 패킷 충돌이 일어날 수 있으며, 이로 인해 throughput 저하와 재전송으로 인한 추가 에너지 소비가 발생한다. 특히 이러한 에너지의 불필요한 소모가 지속되는 경우 저전력을 목표로 하는 네트워크의 생명주기를 단축시킬 수 있다.

이를 해결하기 위해 다양한 해결책들이 제시되었는데, 그 중 대표적인 방법은 backoff exponent (BE) 값과 backoff period (BP)를 적절하게 설정하여 센서 노드들의 채널 접속 기회를 확보하는 것이다[2]. 이러한 백오프 조절 방식은 802.15.4를 크게 수정하지 않고 throughput 향상과 에너지 소모를 완화할 수 있다는 장점을 가지지만, 여러 노드가 동시 전송을 시도하는 경우에 발생하는 패킷 충돌로 인한 성능 저하는 해결할 수 없다는 한계를 가진다.

이러한 문제점을 보다 근본적으로 해결하기 위하여 본 논문에서는 노드 간 충돌과 이로 인한 재전송을 줄임으로써 throughput과 에너지 효율성을 향상시킬 수 있는 효과적인 충돌 해결 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 데이터 패킷을 전송하기 전 preamble address (PA)를 이용하여 다른 센서 노드와 경쟁 단계를 수행한다. 그리고 이 경쟁 단계를 통해 오직 한 개의 센서 노드만이 데이터 패킷을 전송하도록 함으로써 패킷 충돌을 회피한다. 실험 결과를 통해 제안하는 기법을 적용했을 경우 기존 백오프 알고리즘보다 더 적은 에너지를 소모하는 반면, 높은 throughput을 얻을 수 있다는 것이 확인되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 802.15.4의 충돌 해결(collision resolution) 문제를 개선하기 위해서 제안된 기존 연구 결과들을 살펴본다. 3장에서는 제안하는 기법을 설명하고, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가하도록 한다. 마지막으로, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 관련 연구

IEEE 802.15.4 표준에 따르면 slotted CSMA/CA에서는 코디네이터 혹은 센서 노드가 데이터 패킷 전송을 시도하기 전에 백오프 동작을 다음과 같이 수행한다. BP 값은 [0, 2^{BE}-1] 범위에서 임의의 값으로 설정되며, 전송 실패가 발생할 때마다 BE가 1씩 증가한다. 최초 BE 값은 *minBE*이고 최대 BE 값은 *maxBE*일 때, *i*번째 재전송의 BE는 다음과 같다.

$$BE = \min(minBE + i, maxBE) \quad (1)$$

BP는 한 슬롯타임마다 1씩 감소된다. BP 값이 0이 되면 노드는 채널에 대하여 두 번의 clear channel assessment (CCA) 수행한 뒤 데이터 패킷 전송을 시작한다. 하지만 802.15.4 CSMA/CA의 랜덤 백오프는 대역폭의 낭비와 에너지의 소모를 증가시킬 수 있다는 문제를 가지고 있다. 그 이유는 IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF)와 달리, 다른 노드에 의해 채널이 점유되더라도 계속 BP를 감소시키기 때문에, BP가 쉽게 0에 도달하여 더 큰 백오프를 재실행할 수 있기 때문이다. 또한 네트워크 경쟁이 심한 환경에서는 높은 BE가 필요하지만, 데이터 패킷이 전송될 때마다 BE가 초기값으로 재설정되기 때문에 잦은 충돌이 발생할 수 있다.

참고문헌 [3], [4], [5]에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용한다. 참고문헌 [3]에서는 큰 BE를 이용해 BP 값을 크게 설정한 뒤, 유휴한 슬롯이 연속으로 발견되었을 때 BP를 지수적으로 빠르게 감소시킨다. 참고문헌 [4]에서는 패킷 충돌이 발생하거나 성공적인 전송을 수행하였을 때, BE를 동적으로 증가시키거나 감소시킴으로써 네트워크의 성능을 향상시킨다. 참고문헌 [5]에서는 전송상태에 따라 센서 노드들의 *minBE*를 동적으로 변화시키며 백오프 시간으로 인한 채널의 이용률을 높인다. 하지만 이들은 전송 실패 시, 전송 실패의 원인을 고려하지 않고 무조건 BE를 증가시키기 때문에 시스템의 성능이 저하될 수 있다는 한계를 가진다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 참고문헌 [2]에서 제안하고 있는 Enhanced Collision Resolution

www.dbpia.co.kr

(ECR) 알고리즘은 Clear Channel Assessment (CCA) 실패와 ACK 수신 실패를 구분하여 BE를 조절한다. 즉, 성공적인 전송이 이루어졌을 때에만 BE를 감소시키고, 연속으로 일정한 횟수만큼 CCA를 실패하거나 데이터 패킷 전송 후 ACK이 돌아오지 않을 때에만 BE를 증가시킴으로써 노드들이 적절한 백오프를 수행하도록 한다. 또한 Enhanced Backoff (EB) 알고리즘은 다른 노드에 의해 채널이 점유된 상태에서 BP가 0에 도달하여 불필요하게 BE가 증가하는 것을 막기 위해, 평균적인 패킷의 길이를 고려해 BP를 더 크게 설정함으로써 IEEE 802.11 DCF의 백오프 freezing과 같은 효과를 얻는다.

Ⅲ. 문제 분석 및 새로운 기법 제안

3.1. 기존 알고리즘의 문제점

앞서 살펴본 바와 같이 참고문헌 [2]에서 제안한 BE 조절 알고리즘을 적용한다면 불필요하게 BE 값이 증가하거나 초기화되는 것을 완화함으로써 큰 수정 없이 효율적으로 throughput 향상과 에너지 절약 문제를 완화할 수 있다. 하지만 이러한 기존 BE 조절 알고리즘을 이용하더라도 센서 노드들이 동일한 BP 값을 선택했을 경우에 발생하는 충돌 문제는 해결하지 못한다는 한계를 가진다. 본 논문에서는 센서 노드 간 패킷 충돌 가능성을 제거하여 높은 throughput을 보장함과 동시에 에너지 효율적인 통신을 수행할 수 있는 새로운 기법을 제안하고자 한다.

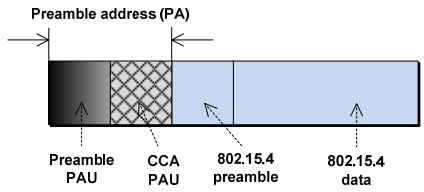

그림 1. 제안 기법의 패킷 전송 기본 구조
Fig. 1. Preamble construction and integration with an 802.15.4 packet

3.2. 제안 기법 기본 구조

그림 1은 제안 기법을 수행하기 위한 패킷 전송의 기본 구조를 보여준다. 그림에서와 같이, 제안 기법에서는 실제 802.15.4 데이터 패킷을 전송하기 전 preamble address (PA)를 이용한 경쟁 단계를 먼저 수행한다. 하나의 PA는 802.15.4의 슬롯과 동일한 크기의 preamble address unit (PAU) 조합으로 구성되며, 각 PAU에는 preamble PAU 또는 CCA PAU가 할당될 수 있다.

각 PAU가 수행하는 역할은 다음과 같다. 먼저 preamble PAU에서는 pseudo-random (PR) 비트로 이루어진 일련의 PR preamble을 전송하며, CCA PAU에서는 다른 센서 노드가 전송한 PR preamble을 감지한다. 만일 CCA PAU에서 다른 센서 노드가 전송한 PR preamble를 감지하는 경우, 해당 노드는 채널이 유휴해질 때까지 패킷 전송을 중지함으로써 패킷 충돌 가능성을 제거한다.

3.3. Preamble Address 구성

각 센서 노드는 서로 다른 PAU 조합으로 구성된 PA를 이용해 다른 노드와 발생할 수 있는 패킷 충돌을 회피함으로써, 시스템 throughput의 저하와 재전송으로 인한 에너지의 소비를 줄인다. 각 센서 노드가 사용하는 PA는 코디네이터가 주기적으로 전송되는 비콘 프레임에 PA의 인덱스와 노드 주소가 함께 저장되어 센서 노드에게 알려진다. PA 패턴은 연속된 CCA PAU가 나타나지 않는 preamble PAU와 CCA PAU의 조합으로써, 센서 노드의 수와 인덱스 번호를 통해 쉽게 생성이 가능하다. 따라서 각 센서 노드는 비콘을 통해 수신한 전체 노드의 수와 자신의 주소에 대응하는 PA 인덱스를 이용, 패킷 전송 전에 의사 난수를 생성하여 서로 다른 PA 패턴을 선택한다.

PA의 크기는 기본적으로 네트워크에 존재하는 노드의 수에 의하여 결정된다. 중요한 것은, PA의 길이가 길어짐에 따라 하나의 데이터 패킷 전송에 따른 오버헤드가 함께 커지기 때문에 가능한 한 짧은 길이의 PA를 사용하는 것이 유리하다. 앞서 살펴본 바와 같이 하나의 PA는 다수 개의 PAU 조합으로 구성되며, 각 PAU에는 preamble PAU 또는 CCA PAU가 할당될 수 있다. 따라서 노드의 수가 n일 때, PA의 최소 슬롯 수는 $\lceil \log_2 n \rceil$이다. 그러나 PA 내에 CCA PAU가 두 번 연속 나타날 경우, PA 단계 수행 중 임의의 노드가 채널이 유휴하다고 판단하여 새로운 패킷 전송을 시도할 수 있다. 따라서 코디네이터는 연속된 CCA PAU가 나타나지 않도록 PA를 구성해 노드에게 할당한다.

PA의 슬롯 수가 i일 때 (i>0, i는 정수), 위와 같은 조건을 만족하는 PA의 경우의 수 $N(PA_i)$는 다음과 같다.

$$N(PA_i) = X_i + Y_i \tag{2}$$

www.dbpia.co.kr

이 때 X_i와 Y_i는 각각 i번째 PAU에 preamble PAU, CCA PAU가 할당될 수 있는 경우의 수를 나타낸다. Preamble PAU는 i-1번째 PAU와 상관없이 할당 가능하지만, CCA PAU는 i-1번째 PAU가 preamble PAU인 경우에만 할당될 수 있다. 따라서 X_1=1, Y_1=1 일 때, X_j와 Y_j(j>1, j는 정수)는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$X_j = X_{j-1} + Y_{j-1}$$
$$Y_j = X_{j-1} \quad (3)$$

그림 2는 노드가 3개인 네트워크 환경에서 사용 가능한 PA를 보여준다. 그림과 같이, 각 노드는 서로 다른 PA를 이용해, 데이터 패킷 전송 전, PA 경쟁 단계를 거치며 통신을 수행한다. 한편 코디네이터가 각 센서 노드에게 할당할 PA를 결정하는 데에는 라운드 로빈(Round-Robin), 휴리스틱(Heuristic), 고정할당 등 다양한 방법이 가능하다. 그 중에서 제안 기법에서는 랜덤(Random)방식으로 PA를 배타적으로 할당함으로써 각 센서 노드의 공평성을 보장한다.

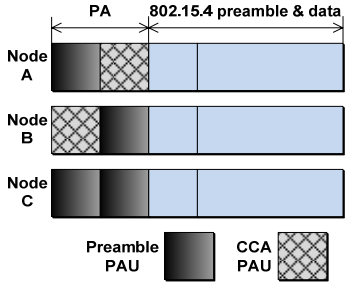

그림 2. 각 센서 노드의 PA 할당
Fig. 2. An example of PA allocation

3.4. Preamble Address Detection

센서 노드는 채널에 접속하기 위하여 슬롯 기반으로 동작하며, 이를 위해 각 노드는 코디네이터가 전송하는 비콘 프레임을 주기적으로 수신하여 노드 간 동기화를 이루고 슈퍼프레임의 구조를 파악한다. 이후 전송할 패킷이 발생하면 채널에 대한 두 번의 CCA를 수행하는데, 이 과정에서 다른 노드에 의한 채널 점유가 확인되면 채널이 유휴해질 때까지 패킷 전송을 중지한다. 그러나 CCA 수행 결과, 채널이 비어있다고 판단될 경우에는 패킷 전송을 시작한다. 이때 센서 노드는 실제 802.15.4 데이터 패킷을 전송하기 전에 먼저 PA 단계를 수행하여 다른 노드와의 동시 전송으로 인한 패킷 충돌의 가능성을 피한다.

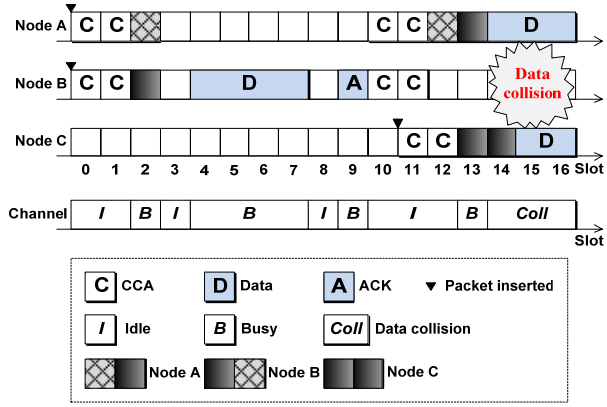

그림 3. 패킷 전송의 예
Fig. 3. An example of packet transmission using PA

그림 3은 3개의 센서 노드 A, B, C가 존재하는 네트워크 환경에서 패킷 전송을 수행하는 예를 보여준다. 먼저 슬롯 0 시점에 노드 A와 B에 패킷이 발생하여 두 번의 CCA를 수행한 뒤, 슬롯 2부터 PA 단계를 시작한다. 그런데 노드 A는 PA의 첫 PAU 슬롯에서 preamble CCA를 수행하는 반면, 노드 B는 PR preamble을 전송한다. 따라서 노드 A는 B가 전송한 PR preamble을 발견하고 전송을 중지한다. 이후 슬롯 3에서 노드 B가 preamble CCA를 수행하지만, 채널이 비어있음을 판단하고 데이터 패킷을 슬롯 4부터 전송한다. 그리고 노드 B의 전송이 완료하면, 노드 A는 패킷 전송을 다시 시도함으로써 두 노드 간 충돌을 피한다.

그러나 센서 노드들이 패킷 전송을 서로 다른 시점에 시작하는 경우에 충돌 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어 그림 3의 슬롯 13에서와 같이, 노드 A의 PA 단계가 슬롯 12부터 이미 진행되고 있는 중간에 노드 C의 PA 단계가 시작할 경우, 두 센서 노드는 서로를 발견하지 못하고 슬롯 14부터 충돌을 겪게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안 기법에서는 그림 4와 같이 CAP 구간을 PA슬롯 크기로 나누고, 이렇게 구분된 PA슬롯의 시작 시점에만 데이터 패킷의 전송 시도를 허용한다. 따라서 그림 4에서와 같이, 노드 C는 슬롯 11에 패킷이 발생하더라도 다음 PA슬롯의 시작인 슬롯 12에 CCA를 시작한다. 이 경우에 노드 C는 두 번의 CCA 과정에서 노드 A의 PR preamble을 인지하고 전송을 중지함으로써 충돌을 피할 수 있다.

www.dbpia.co.kr

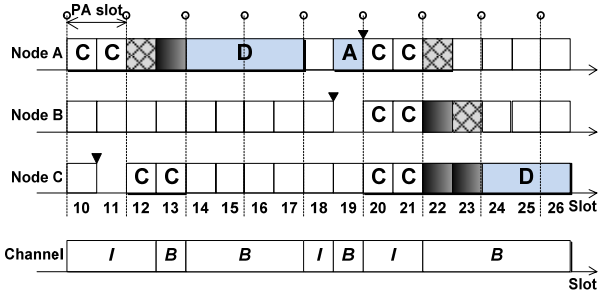

그림 4. PA를 이용한 충돌 회피의 예
Fig. 4. An example of collision avoidance using PA

또 다른 문제는 그림 4의 슬롯 22에서와 같이, PA 구간에서 PR preamble 간 충돌이 발생하는 경우이다. 만일 여러 노드가 동일한 슬롯타임에 preamble PAU를 갖는다면, 이들 간의 충돌로 인하여 preamble CCA를 수행하는 노드가 PR preamble을 제대로 수신하기 어렵다. 따라서 제안 기법에서는 correlation을 이용하여 PR preamble 간 충돌 여부를 확인한다. Correlation은 수신한 신호로부터 이미 알려진 신호의 패턴을 찾아내기 위하여 널리 쓰이고 있는 기법이다[6]. 중요한 것은, 수신한 신호에서 PR preamble이 섞여있음을 확인하기 위해서는, 전후 비트 간 상관성이 전혀 없이 완전히 랜덤하게 구성해야 한다. 현재 PR 시퀀스를 생성하는 다양한 기법들이 제안되었는데, 그 가운데 gold code (GC)[7]는 이러한 조건을 만족한다. 무선통신 분야에서 주로 사용되는 GC는 길이 $L=2^l-1$ (l은 정수)의 이진수로 이루어진 PR 시퀀스로써 상호상관이 거의 없는 무작위 신호를 코드로 사용하고 있다.

따라서 preamble CCA를 수행하는 노드는 해당 PAU 슬롯에서 PR preamble을 제대로 수신할 수 없는 경우, 수신한 신호를 샘플 단위로 correlation을 계산하여 PR preamble 패턴이 나타나는지 확인한다. 앞서 설명한 바와 같이, PR preamble을 구성하는 각 비트는 시퀀스 내에서 서로 독립적이므로 PR preamble 충돌이 발생하지 않으면 거의 0에 가까운 값을 갖는다. 그러나 수신한 신호 가운데 높은 correlation 값을 보이는 샘플이 나타난다면, 이는 새로운 PR preamble 전송의 시작으로 인한 PR preamble 충돌을 의미하기 때문에 전송을 중지하고 충돌을 피한다.

3.5. 성능 분석

성능 평가에 앞서 PA를 이용하여 패킷 충돌을 회피할 경우에 얻을 수 있는 throughput과 에너지 절약을 예측하기 위해 참고문헌 [8]의 모델을 바탕으로 수식 모델을 설계한다. 분석을 단순화하기 위해 큐에 항상 전송할 패킷이 차 있는 상태라고 가정한다.

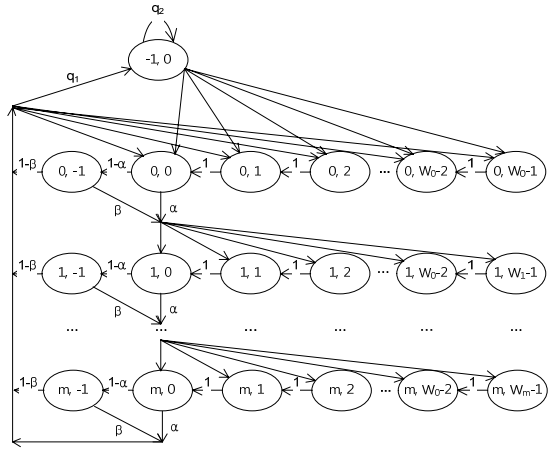

그림 5. Markov 체인 모델
Fig. 5. Markov chain model

그림 5는 참고문헌 [8]에서 쓰인 Markov 체인 모델이다. 이 모델에 따르면 센서 노드가 임의의 슬롯에서 패킷 전송 시도가 가능한 확률 $b_{0,0}$는 아래의 식 (4)와 같이 표현된다.

여기서 α와 β는 각각 첫 번째 CCA와 두 번째 CCA에서 채널이 busy할 확률, q_1은 임의의 패킷 전송을 수행한 후 추가 전송할 패킷이 큐에 존재하지 않을 확률, q_2는 하나의 유휴 슬롯 후 전송할 패킷이 큐에 존재하지 않을 확률을 의미한다. 그러나 본 분석에서는 큐에 항상 패킷이 존재하는 상태를 가정하기 때문에 q_1과 q_2는 모두 0으로 설정한다. 이 때, 첫 번째 CCA와 두 번째 CCA에서 채널이 busy할 확률 α와 β가 서로 독립적일 경우 동일한 값을 가지며, 동시에 두 개 이상의 센서 노드가 패킷을 전송할 확률 α는 식 (5)와 같다.

$$b_{0,0}=\begin{cases}\dfrac{2(1-q_2)(1-2p)(1-p)}{2^{minBE}W(1-q_2)(1-p)[1-(2p)^{m+1}]+(1-q_2)(1-2p)(3-\alpha)(1-p^{m+1})+2q_1(1-2p)(1-p)} & if\ m\le 5-minBE\\ \dfrac{2(1-q_2)(1-2p)(1-p)}{2^{minBE}W(1-q_2)(1-p)[1-(2p)^{6-minBE}]+(1-q_2)(1-2p)[(3-\alpha)(1-p^{m+1})+32W(p^{6-minBE}-p^{m+1})]+2q_1(1-2p)(1-p)} & if\ m>5\text{ - }minBE\end{cases} \quad (4)$$

www.dbpia.co.kr

$$\alpha = 1-(1-\gamma)^{n-1} \tag{5}$$

센서 노드가 패킷을 전송하기 위해서는 반드시 두 번째 CCA에서 채널이 idle할 때에만 가능하기 때문에, 패킷을 전송할 확률 γ는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = (1-\beta)\tau \tag{6}$$

첫 번째 또는 두 번째 CCA에서 채널이 busy할 확률 p는 다음과 같으며,

$$p = \alpha + \beta - \alpha\beta \tag{7}$$

위의 식을 바탕으로, 첫 번째 CCA와 두 번째 CCA를 수행할 확률 ω와 τ은 각각 아래 식으로 표현될 수 있다.

$$\omega = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} = \sum_{i=0}^{m} p^i b_{0,0} = \frac{1-p^{m+1}}{(1-p)} b_{0,0} \tag{8}$$

$$\tau = \sum_{i=0}^{m} b_{i,-1} = \sum_{i=0}^{m} (1-\alpha) b_{i,0} = (1-\alpha)\omega \tag{9}$$

한편, 한 개 이상의 센서 노드가 임의의 슬롯에서 패킷 전송을 시도할 확률 P_{tr}은 아래 식으로 표현된다.

$$P_{tr} = 1-(1-\gamma)^n \tag{10}$$

따라서 n개의 센서 노드 중, 오직 한 개의 노드만이 전송을 시도하는 경우의 수는 n이므로, 패킷 전송이 발생했을 때 해당 패킷이 충돌 없이 전달될 확률 P_s는 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$P_s = \frac{n\gamma(1-\gamma)^{n-1}}{P_{tr}} \tag{11}$$

이제 시스템 전체의 throughput을 모델링한다. 참고문헌 [8]을 바탕으로 전체 throughput S는 아래와 같이 표현할 수 있다.

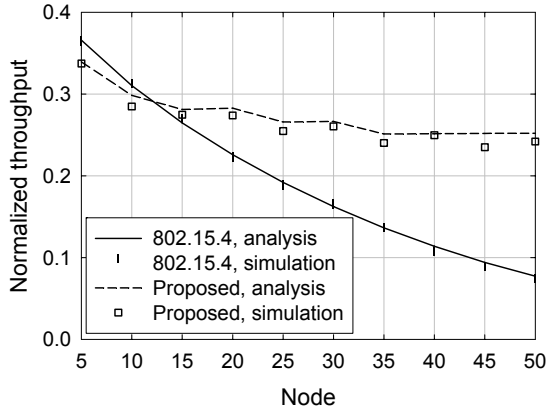

그림 6. Saturated 트래픽 환경에서 센서 노드 수의 변화에 따른 normalized throughput의 차이
Fig. 6. Normalized throughput with varying the number of sensors under the saturated traffic condition

$$\begin{aligned} S &= \frac{E(\text{단위슬롯 당 성공적으로 } payload \text{ 를 전송하는 시간})}{E(\text{단위슬롯의길이})} \\ &= P_s P_{tr} T_{E(P)} / [P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s) T_c + (1-P_{tr}) P_b \sigma + \\ &\quad (1-P_{tr}) P_{CCA} T_{CCA} + 2(1-P_{tr}) + 2(1-P_{tr}) P_{2CCA} T_{CCA}] \end{aligned} \tag{12}$$

이때 $T_{E(P)}$는 데이터 payload의 평균적인 전송 시간, σ는 슬롯타임의 길이, T_s는 성공적인 전송이 발생했을 때 채널이 점유되는 평균적인 시간, 그리고 T_c는 패킷 간 충돌이 발생했을 때 채널이 점유되는 평균적인 시간을 나타낸다. T_s와 T_c는 각각 아래와 같이 구할 수 있다.

$$T_s = LIFS + T_{PA} + T_H + T_{E(P)} + SIFS + T_{ACK} \tag{13}$$

$$T_c = 0 \tag{14}$$

여기서 *LIFS* (Long InterFrame Space)와 *SIFS* (Short InterFrame Space)는 PHY로부터 받은 프레임을 처리하기 위한 시간, T_H와 T_{ACK}은 각각 헤더(PHY, MAC헤더)의 전송시간, ACK 프레임의 전송시간을 나타내며, T_{PA}는 PA의 슬롯타임을 나타낸다. 제안하는 기법에서는 PA 단계를 이용하여 오직 한 개의 센서 노드만이 데이터 패킷을 전송하기 때문에 충돌로 인해 채널이 점유되는 시간 T_c는 0이 되며, CCA 수행 확률 및 슬롯이 busy할 확률을 정규화하면 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

www.dbpia.co.kr

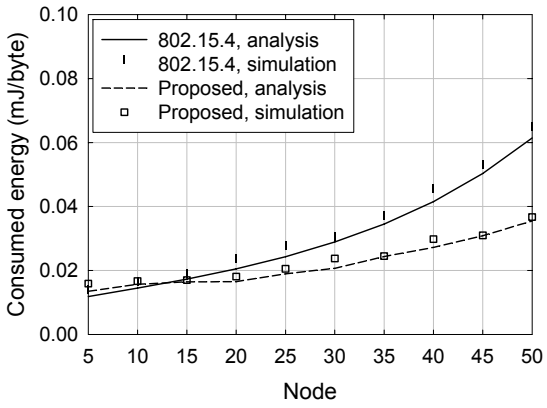

그림 7. 큐에 항상 패킷이 차 있는 환경에서 센서 노드 수의 변화에 따른 에너지 소모량 비교
Fig. 7. Energy consumption with varying the number of sensors under the saturated traffic condition

$$\begin{cases} P_{CCA} = \dfrac{\omega\alpha}{1-\tau(1-\beta)} \\ P_{2CCA} = \dfrac{\tau\beta}{1-\tau(1-\beta)} \\ P_b = 1 - P_{CCA} - P_{2CCA} \end{cases} \quad (15)$$

그림 6은 센서 노드의 수의 변화에 따른 제안 기법과 802.15.4의 결과이다. 이 때 payload 길이는 70-byte로 설정하였다.

다음은 에너지의 소모량을 분석하기 위해 E_{TX}, E_{RX}, E_{Idle}을 정의한다. E_{TX}는 패킷 전송 에너지, E_{RX}는 패킷 수신 에너지, E_{Idle}은 대기 상태의 에너지를 나타낸다. 분석을 단순화하기 위해, 한 PA 내에서 preamble PAU와 CCA PAU의 분포가 동일하다고 가정했을 때, 성공적인 패킷 전송을 수행했을 때의 평균 에너지 소비 E_s와 PA 단계에서 패킷 전송이 실패했을 때의 평균 에너지 소비 E_c는 다음과 같다.

$$E_s = 2E_{RX}T_{CCA} + 0.5 \times T_{PA}(E_{TX} + E_{RX}) + E_{TX}T_{H+E(P)} + E_{Idle}T_{Delay} + E_{RX}T_{ACK} \quad (16)$$

$$E_c = 2E_{RX}T_{CCA} + 0.25 \times T_{PA}(E_{TX} + E_{RX}) \quad (17)$$

여기서 T_{CCA}는 CCA 수행 시간, T_{Delay}는 *LIFS*와 *SIFS*의 시간을 나타낸다. 따라서 하나의 패킷을 성공적으로 전송하는 데에 소모되는 에너지는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

MAC Header	13B	LIFS	640us
PHY Header	6B	ACK Timeout	864us
ACK	11B	minBE	3
Payload	70B	maxBE	5
1 Slot	320us	maxNB	4

$$E_{avg} = \frac{E(\text{단위슬롯에서소비하는총에너지})}{E(\text{단위슬롯당성공적으로 } payload \text{를전송하는시간})} = [P_s P_{tr} E_s + P_{tr}(1-P_s)E_c + (1-P_{tr})P_{CCA}T_{CCA}E_R + 2(1-P_{tr})P_{2CCA}T_{CCA}] / P_{tr}P_s T_{E(P)} \quad (18)$$

그림 7은 센서 노드의 수가 다양하게 변화할 때의 제안 기법과 802.15.4의 에너지 소비 결과이다. 노드의 수가 증가함에 따라 더 많은 에너지의 소모가 필요하지만, 제안 기법이 보다 효율적인 에너지 사용이 가능함을 보여주고 있다.

Ⅳ. 성능평가

제안하는 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 OPNET 시뮬레이터를 기반으로 실험을 수행하였다. 실험에 쓰인 파라미터는 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 하였고 표 1에 정리되어 있다. 무선 구간에서의 데이터 전송 속도는 250Kbps이고, MICAz mote를 기준으로 Transmit, Receive, Idle, 그리고 Sleep 상태에서의 에너지 소비를 27.7 mA, 17.4 mA, 35 μA, 그리고 16 μA로 설정하였다[9]. 각 센서 노드는 코디네이터를 중심으로 스타 토폴로지를 구성하여 70-byte 크기의 UDP 패킷을 전송한다. 비교 대상으로는 IEEE 802.15.4 beacon-enabled와 참고문헌 [2]의 ECR, 그리고 ECR & EB 알고리즘이 적용된 결과를 비교하였다.

그림 8은 센서 노드 수 변화에 따른 네트워크의 normalized throughput을 보여준다. 센서 노드의 수가 적을 때에는 센서 노드 간 경쟁 및 패킷 충돌로 인한 재전송이 간헐적으로 발생하기 때문에 모든 알고리즘이 비슷한 throughput을 보인다. 그러나 센서 노드의 수가 증가함에 따라 제안하는 알고리즘의 경우 높은 throughput의 보이는 반면, 802.15.4와 ECR, 그리고 ECR & EB는 상대적으로 낮은 시스템 throughput을 갖는 것을 확인할 수 있다.

www.dbpia.co.kr

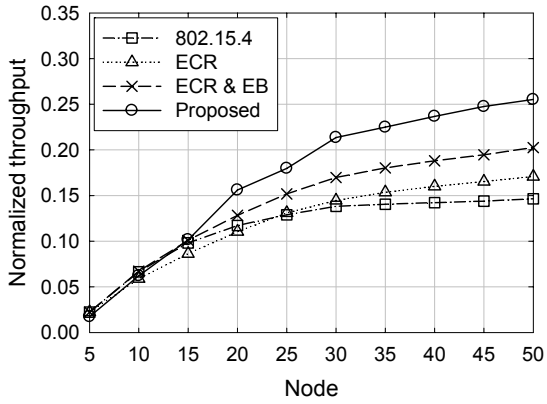

그림 8. 노드 수의 변화에 따른 normalized throughput
Fig. 8. Normalized throughput with varying the number of sensors

그림 9는 센서 노드 수의 변화에 따른 에너지 사용 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 전체적으로 노드의 수가 증가함에 따라 소비 에너지가 증가하는 추세를 보여준다. 특히 제안하는 알고리즘의 경우 노드의 수가 적을 때에는 다른 알고리즘에 비해 다소 높은 에너지 소비를 보인다. 이는 패킷 충돌이 거의 발생하지 않음에도 불구하고, PA 단계의 수행으로 인한 오버헤드 때문이다. 하지만 노드의 수가 증가함에 따라 제안하는 알고리즘이 보다 적은 에너지를 사용함을 알 수 있다.

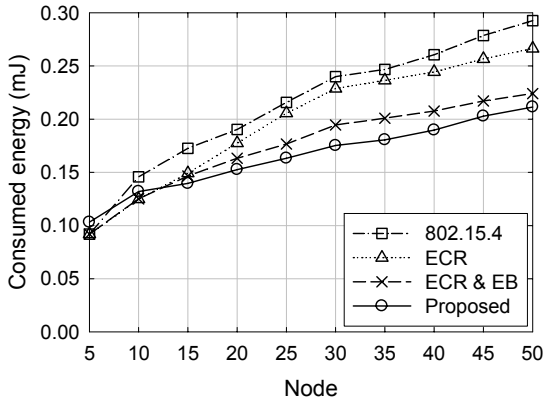

그림 9. 센서 노드 수의 변화에 따른 평균 에너지 소비
Fig. 9. Average energy consumption with varying the number of sensors

그림 10은 각 알고리즘 별 패킷 충돌로 인한 재전송율의 차이를 보여준다. 먼저 802.15.4의 경우, 전송이 성공적으로 이루어질 때마다 BE가 초기 값으로 재설정되기 때문에 현재 환경에 맞는 적절한 BE값을 유지하기 어렵다. 따라서 가장 높은 재전송율을 보인다. ECR은 성공적으로 패킷을 전송하더라도 BE를 초기화시키지 않고 1만큼만 감소시키기 때문에 802.15.4에 비하여 적절한 BE를 유지할 수 있다. 이에 더하여 평균적인 패킷의 길이를 고려해 백오프를 더 크게 설정함으로써 빈번한 전송시도를 막을 수 있는 ECR & EB는 이들보다도 더 낮은 재전송율을 보인다. 한편, 제안하는 기법은 근본적으로 충돌이 발생하지 않도록 PA를 이용하기 때문에, 센서 노드의 수와 상관없이 항상 재전송이 발생하지 않음을 알 수 있다.

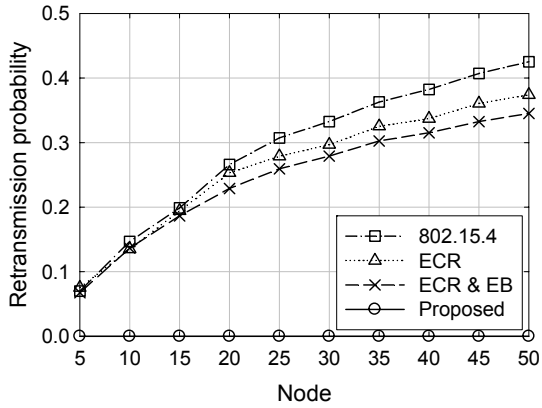

그림 10. 센서 노드 수의 변화에 따른 재전송율의 차이
Fig. 10. Retransmission probability with varying the number of sensors

그림 11은 센서 노드 수의 변화에 따른 비콘 오버헤드에 대한 결과를 보여준다. 예상했던 바와 같이 802.15.4를 비롯한 ECR, ECR & EB의 경우, 센서 노드의 수의 변화와 상관없이 동일한 크기의 비콘이 주기적으로 전송된다. 그러나 제안하는 알고리즘은 비콘에 센서 노드의 주소와 PA 인덱스가 함께 저장되어 전송되기 때문에 센서 노드의 수가 증가함에 따라 비콘의 크기가 함께 증가한다. 이러한 비콘 오버헤드로 인해 네트워크의 성능 저하를 야기할 수 있지만, 간헐적으로 전송되는 비콘의 특성과 다른 무선 네트워크에 비해 전송 속도가 상대적으로 매우 느린 802.15.4 네트워크 환경을 고려했을 때, 그림 11의 센서 노드가 50개인 상황을 가정하더라도 비콘을 전송하기 위해 필요한 추가 전송시간은 심각한 오버헤드가 되지 않으며, 실제로 그림 8과 9의 실험 결과를 함께 고려하였을 때 네트워크의 성능을 크게 저하시키지 않음을 알 수 있다.

www.dbpia.co.kr

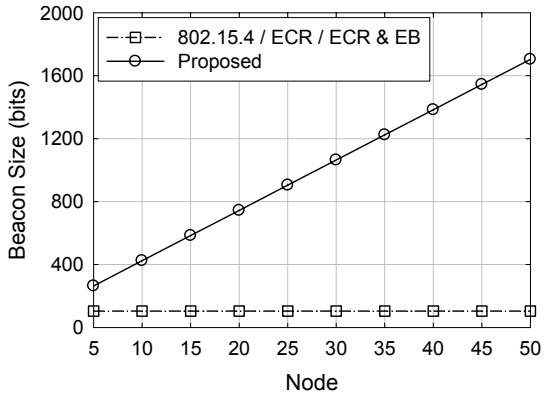

그림 11. 센서 노드 수의 변화에 따른 비콘 오버헤드
Fig. 11. Beacon overhead with varying the number of sensors

그림 12는 Jain's fairness index[10]를 이용해 센서 노드 간 코디네이터에게 전송한 패킷 양에 대한 공평성을 비교한 결과이며, 전반적으로 모든 알고리즘에 대해서 센서 노드의 수가 늘어남에 따라 공평성이 감소하는 경향을 보여준다. 특히 802.15.4의 경우에는 다른 알고리즘에 비하여 보다 많은 감소가 이루어짐을 알 수 있는데, 이는 802.15.4에서는 CCA 결과가 busy할 경우에 BE를 증가시켜 더 큰 백오프를 수행하고, 성공적인 패킷 전송 후에는 BE를 초기값으로 되돌리지만 백오프 수행 중에는 CCA를 수행하지 않기 때문이다. 즉, 임의의 노드가 채널을 점유하여 패킷을 전송한 뒤에는 BE를 초기값으로 되돌려 작은 백오프를 수행하는 반면, 채널 점유에 실패한 노드들은 BE를 증가시켜 더 큰 백오프를 수행하기 때문에, 백오프가 끝난 시점에 이전에 채널 점유에 성공했던 노드가 짧은 백오프 후 다시 채널을 점유하고 있을 확률이 높다. 따라서 일부 센서 노드만 채널을 점유하여 패킷을 전송하는 문제가 쉽게 발생할 수 있다.

그러나, ECR의 경우에는, 연속적으로 CCA 결과가 busy할 경우에만 BE를 증가시키고, 패킷 전송에 성공하더라도 BE를 초기값으로 되돌리는 대신 1만큼만 감소시키기 때문에 802.15.4에 비하여 보다 높은 공평성을 보여준다. 이에 더하여 ECR & EB의 경우에는, 센서 노드의 평균 패킷 전송시간을 백오프 시간에 반영하여 IEEE 802.11 DCF의 백오프 freezing과 같은 효과를 얻음으로써, 백오프 수행 중에는 CCA를 수행하지 않음으로 인해 발생하는 문제를 완화하기 때문에 더 높은 공평성을 갖는다. 제안하는 기법은 BE 값의 변화에 영향을 받지 않고 임의 선정된 PA 패턴에 의해 패킷을 전송할 센서 노드가 결정되기 때문에 다른 알고리즘에 비하여 더 높은 공평성을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

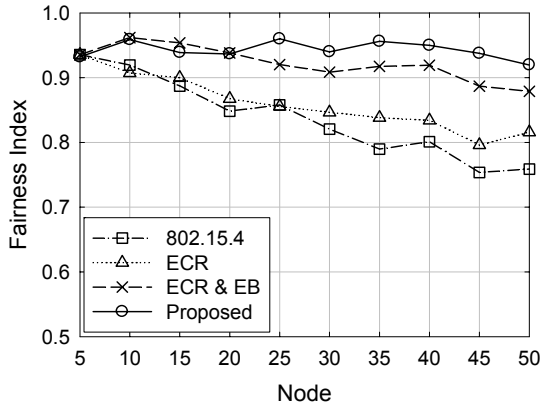

그림 12. 센서 노드 수의 변화에 따른 fairness 비교
Fig. 12. Fairness with varying the number of sensors

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA 기반 무선센서네트워크를 위한 충돌 해결 기법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 패킷 충돌을 회피하여 시스템 throughput을 향상시키고 재전송으로 인한 추가 에너지 소모를 막을 수 있는 기법을 설계하였고, 이와 더불어 시스템 throughput과 에너지 소비를 모델링하였다. 실험 결과를 통해 우리는 새롭게 제안하는 기법이 IEEE 802.15.4 뿐만 아니라 기존에 제안되었던 충돌 해결 알고리즘들과 비교해 높은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

향후 이번 연구 결과를 바탕으로 네트워크의 상황에 따라 적응적으로 충돌을 회피할 수 있도록 제안 기법을 개선하고, IEEE 802.11 기반의 무선랜 시스템으로의 적용 방안에 대해 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] IEEE, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), *IEEE Std 802.15.4a*, 2007 edition.

[2] J. Y. Ha, T. H. Kim, H. S. Park, and S. H. Choi, "An Enhanced CSMA-CA Algorithm for IEEE 802.15.4 LR-WPANs," *IEEE Comm. Letter*, Vol. 11, No. 5, pp. 461-463, May 2007.

www.dbpia.co.kr

[3] Y. G. Kwon, Y. Fang, and H. Latchman, "Design of MAC Protocols with Fast Collision Resolution for Wireless Local Area Networks," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, Vol. 3, pp. 1580-1584, Nov. 2004.

[4] N. O. Song, B. J. Kwak, J. Song, and M. E. Miller, "Enhancement of IEEE 802.11 Distributed Coordination Function Exponential Increase Exponential Decrease Backoff Algorithm," *IEEE VTC-Spring*, Apr. 2003.

[5] J. G. Ko, Y. H. Cho, and H. G. Kim, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 MAC with Different Backoff Ranges in Wireless Sensor Networks," *IEEE ICCS,* Nov. 2006.

[6] P. Castoldi, *Multiuser Detection in CDMA Mobile Terminals*, Artech House Publishers, 2002.

[7] P. Fan and M. Darnell, *Sequence Design for Comm. Application*, Research Studies Press, 1996.

[8] Z. Chen, C. Lin, H. Wen, and H. Yin, "An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA Protocol in Low-rate Wireless Application," *IEEE AINAW*, May 2007.

[9] MICAz Datasheet, http://www.xbow.com

[10] R. Jain, "The art of computer systems performance analysis," John Wiley and Sons, 1991.

정 경 학 (Kyoung-Hak Jung)

2007년 2월 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부

2008년 3월~현재 포항공대 컴퓨터공학과 통합과정

<관심분야> 무선랜, 무선 네트워크, 애드혹 네트워크

서 영 주 (Young-Joo Suh)

1985년 2월 한양대학교 전자공학과

1987년 2월 한양대학교 전자공학과 석사

1996년 미국 조지아 공대 (Georgia Tech) 컴퓨터공학 박사

1988년~1990년 LG전자 연구원

1990년~1993년 충청대학 교수

1996년~1997년 미국 Georgia Tech 연구원

1997년~1998 년 미국 University of Michigan 연구원

1998년~현재 포항공대 컴퓨터공학과/정보전자융합공학부 교수

<관심분야> 무선랜 프로토콜, 이동 IP, 이동 멀티캐스트, ad-hoc/sensor 네트워크, 차세대 이동 네트워크

www.dbpia.co.kr