TPC-BS: 센서 네트워크에서 이진검색 방법을 이용한 빠른 전송전력 결정 방법

오 승 현^{*}

요 약

본 논문은 IEEE 802.15.4의 MAC 계층에서 노드간 거리와 환경에 따라 적절한 전송전력 값을 설정하여 무선 모뎀의 에너지 소비를 최적화하는 방법에 대하여 제안한다. 제안된 방법은 적절한 전송전력을 결정할 때 이진검색 기법으로 빠르게 최적의 전송전력을 찾을 수 있고, 다수의 메시지 전송에 따르는 오버헤드를 최소화할 수 있다. 결정된 전송전력은 데이터 패킷을 전송할 때 사용되고, 데이터-수신확인 패킷의 교환과정에서 전파환경에 따라 변경된 네트워크 품질에 따라 동적으로 수정된다. 시뮬레이션 실험결과 본 논문에서 제안하는 방법은 IEEE 802.15.4 표준에 비해 에너지 소비량은 30% 감소하고, 단위 에너지양에 의한 데이터 전송량은 2.5배 증가하는 결과를 보였다.

TPC-BS: Transmission Power Control based on Binary Search in the Wireless Sensor Networks

Seung-Hyun Oh^{*}

ABSTRACT

This paper proposes a new method to optimize energy consumption in a wireless modem by setting up a transmission power value according to the distance between nodes and circumstance in the MAC layer of IEEE 802.15.4. The proposed method can dynamically find an optimal transmission power range using the binary search scheme and minimize overhead caused by multiple message transmissions when determining the optimal transmission power. The determined transmission power is used for transmitting data packets and can be modified dynamically depending on the changes in a network environment when exchanging data packets and acknowledgement signals. The results of the simulations show 30% reduction in energy consumption while 2.5 times increase in data transmission rate per unit of energy comparing with IEEE 802.15.4 standard.

Key words: Sensor Networks(센서 네트워크), IEEE 802.15.4(IEEE 802.15.4), Transmission Power(전송 파워), Energy Efficiency(에너지 효율성)

1. 서 론

무선 센서 네트워크(WSN)의 가장 중요한 특징 중의 하나는 센서 노드의 제한된 리소스이다. 센서노드는 가격과 사용목적 때문에 제한된 규모로 구성되

로 제한된 CPU, 메모리, 통신모듈, 배터리 등으로 구성된다[1]. 배터리를 사용하는 노드들은 저전력 저가의 시스템으로 에너지 사용에 제약을 받고 배터리가 소모되어 노드의 동작이 멈추면 더 이상 네트워킹의 수단으로 사용될 수 없다. 따라서 무선 센서 네트워

※ 교신저자(Corresponding Author): 오승현, 주소: 경북 경주시 석장동 707번지, 동국대학교 컴퓨터공학부(780-714), 전화: 054)770-2243, FAX: 054)770-2816, E-mail: shoh@dongguk.ac.kr

접수일: 2011년 7월 26일, 수정일: 2011년 9월 15일
완료일: 2011년 11월 30일

^{*} 종신회원, 동국대학교 컴퓨터공학부

※ 본 논문은 2009년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.

크는 노드에 사용되는 전력 사용을 효율적으로 하여 각 센서 노드의 에너지 소모를 최소화하는 것이 무선 센서 네트워크 구축에 가장 중요한 문제이다. 센서 노드의 에너지 소비에서 무선 송수신 부분이 가장 많은 비중을 차지하므로 무선 센서 네트워크는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜의 설계가 중요하며 이에 대한 많은 연구가 이루어졌다.

그 중에서 센서 노드의 전송전력을 조절하는 방법에 대해 많은 연구가 있었고 [2,3,4,5,6-8,9,10], 무선 모뎀의 에너지 소비는 센서 노드의 전력소비에서 가장 높은 비중을 차지하고 있으며[11], 너무 높은 전송전력은 오버히어링(overhearing) 등의 문제를 발생시켜서 네트워크의 성능을 떨어지게 한다. 전송전력 조정은 전체 네트워크의 모든 노드가 단일 전송전력을 사용할 때 이것을 조정하는 것과 노드 단위 또는 링크 단위의 전송전력을 조정하는 것 등으로 구분할 수 있다. 전송전력 조정은 거리에 따라 필요한 전송전력을 조절하는 것과 전파환경의 변화에 따라 조정하는 것으로 구분할 수 있다. 전송전력 조정의 효과는 당연히 에너지 소비 절감과 함께 전파장애(interference)나 충돌(collision)을 방지하고 공간적으로 주파수를 재사용할 수 있도록 함으로써 네트워크 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문은 에너지 소비를 줄이기 위해 IEEE 802.15.4 표준[3]의 MAC 계층에서 센서 노드간의 거리에 따라 적절한 전송전력 값을 빠르게 설정하여 이 과정에서 발생하는 오버헤드를 최소화하고 에너지 소비를 최적화하는 방법을 제안한다. 노드간 거리를 고려하지 않은 전송전력 값을 사용하면 불필요한 에너지 소비와 다양한 문제점을 발생시키므로 노드간 거리에 따라 적절한 전송전력 값을 사용해야 한다. 우리는 이진검색 방법을 도입해서 노드간 거리에 알맞은 전송전력을 결정하기 위해서 전송하는 시험용 패킷을 최소화하였다. 이 방법은 기존 연구와 차별화되는 요소로 노드간 거리에 알맞은 전송전력을 빠르게 찾을 수 있다.

제안 기법 TPC-BS는 2단계 과정을 거쳐서 최적의 전송전력이 결정 운영된다. 첫 번째 단계는 어떤 노드가 데이터를 처음 전송할 때 필요한 전송전력 값이 결정되어있지 않다면 노드는 이진 검색 방법으로 전송전력을 찾기 위한 시험 패킷을 전송한다. 이 방법은 주문기반(on-demand) 방식[12]으로 전송전

력의 결정이 필요한 노드에 대해서만 검색이 적용되므로 모든 노드에 대해 전송전력을 결정하는 방식 [7,13,14]에 비해 효율적이다.

두 번째 단계는 센서 네트워크의 전파 상태가 노드의 이동, 시간과 기상상태 등 다양한 원인에 의해 변할 때 이러한 변화를 동적으로 추적·반영하는 과정이다. 정해진 전송전력으로 데이터 패킷을 전송하면 수신 노드는 ACK 응답 패킷을 만들 때 노드의 좌표 값과 안테나 수신 값을 패킷에 추가하여 보낸다. ACK 응답 패킷을 받은 송신 노드에서는 수신된 노드의 좌표 값을 이용하여 노드간의 거리를 구해서 경로 손실(path loss) 값을 계산하고, 임계(threshold) 값과 경로 손실 값을 이용하여 전송전력 값을 최적화한다. 따라서 제안된 TPC-BS는 노드별로 작합하게 특화된 전송전력 제어를 통해 최적화된 전력소비를 보장할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 연구에 대하여 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 TPC-BS 기법에 대하여 설명한다. 4장에서는 TPC-BS의 시뮬레이션 결과를 분석하고 설명한다. 5장에서는 결론과 향후 과제를 제시한다.

2. 관련 연구

WSN에서 전송전력을 조절하려는 많은 연구가 있었다. 대다수의 연구들은 노드간 거리와 주변 환경에 적합한 전송전력을 결정하는 다양한 시도들이다. 예를 들어, 연구 [3]은 전송전력의 변화가 링크 품질에 미치는 영향에 대한 연구를 제시하고 백리스트(back-listing) 기법에 의한 전송전력 제어 방법을 제시했다. [3]은 패킷 수신율(PRR)에 기반을 둔 링크 품질을 측정하기 위해서 시험 패킷을 전송하고, 전송된 시험 패킷 중에서 PRR 임계치를 초과하는 패킷은 제외하고 남은 패킷 중에서 가장 작은 전송전력으로 전송된 패킷이 적합한 전송전력으로 선택된다. 수신 신호세기(RSSI)는 거리, 다중경로(multi-path), 전파장애와 시간에 따라 영향을 받기 때문에 PRR이 적합한 전송전력을 결정하는데 가장 적합한 기준이라고 주장했다. 그러나 PRR 측정을 위해 많은 전송전력 수준에서 시험 패킷을 전송해야 하므로 에너지의 과다소비와 이에 따른 네트워크 수명이 단축될 수 있다. 또한 노드의 개수가 증가하면 충돌에 의해

PRR을 측정하는데 어려움이 발생할 수 있다.

[15]는 RSSI와 LQI를 이용해서 적합한 전송전력을 예측하고 있으며, 피드백 기법을 도입해서 시간에 따라 변화하는 링크 품질을 반영하고 있다. 이 연구는 초기화 단계와 실행 및 교정 단계의 두 가지 단계로 구성되어 있다. 초기화 단계는 각 노드가 서로 다른 전송전력 수준으로 비콘(beacon) 신호를 전송하고, 이웃 노드에서 RSSI/LQI를 측정해서 적합한 전송전력을 결정한다. 실행 및 교정 단계에서는 피드백 기법으로 전송전력을 교정한다. 이 방법은 [3]의 오버헤드를 경감시켜주고 링크의 품질을 유지시켜주는 장점이 있다. 그러나 네트워크에 참여하는 노드의 숫자가 증가할 경우 전파장애와 다중경로 등의 이유로 RSSI 측정이 원활하지 않을 수 있다.

또한 [4]는 네트워크에 적용된 전송전력의 제어 수준을 다음의 3가지로 구분하고 더 자세한 구분 이 더 효과적임을 보였다. 가장 조악한 수준은 네트워크의 모든 노드가 하나의 전송전력을 사용해서 에너지 소비를 절감하려는 그룹[7,9,13,14,16]으로 네트워크 수준의 해결방법을 제시한다. [5,6,8,16-20]의 그룹은 각 노드가 모든 이웃 노드에게 적용 가능한 하나의 전송전력을 선택하는 노드 수준의 전송전력을 적용하는 그룹이며, [15,21,22]은 각각의 이웃 노드에 따라 다른 전송전력을 사용하는 이웃 노드별 수준을 적용한다.

기존의 거의 모든 연구는 정확도와 비용 사이에서 더 나은 균형점(tradeoff)을 얻기 위한 것으로 패킷 전송에서 더 작은 에너지 소비를 위한 더 정밀한 제어를 목표로 하고 있다. 본 논문에서 제안하는 TPC-BS 기법은 이웃노드 수준에 속하는 것으로, 이웃 노드를 검색하고 각각의 이웃 노드에 대해 적합한 전송전력을 찾고 노드별 테이블에 저장하고 사용한다. TPC-BS의 기여점은 기존의 연구와 다르게 각각의 이웃 노드에 알맞은 전송전력을 결정하는 과정에서 이진검색 기법을 이용해서 매우 빠르고 링크에 적합한 전송전력 수준을 찾을 수 있도록 하고, 시간 및 공간의 변화에 따라 전파 환경이 변화하는 것을 반영하기 위해 ACK 신호 패킷에 RSSI 값을 포함하여 동적으로 전송전력을 변경한다.

3. TPC-BS: 이진검색 기반 전송전력

전송전력은 패킷의 전달 범위를 결정하며 센서 노

드의 에너지 소비에 직접적으로 영향을 미친다. 노드가 밀집된 상태에서 지나치게 넓은 패킷 전달 범위는 패킷 충돌과 오버히어링(overhearing) 등 많은 부작용을 일으키고 범위 내에 있는 다른 노드의 패킷 전달이 중지되는 등 네트워크의 성능에 부정적 영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위한 전송전력의 적절한 조절은 매우 중요한 부분이다. 우리는 빠르게 적절한 전송전력 값을 찾을 수 있는 TPC-BS(Transmission Power Control based on Binary Search) 방법 즉, 이진검색 기반 전송전력 결정 방법에 대해 설명한다. TPC-BS는 네트워크의 초기 단계에서 이진검색 기법을 이용해서 빠르게 적절한 전송전력 값을 결정하는 단계와 네트워크가 운용되는 도중에 메시지가 송수신될 때마다 측정된 신호의 RSSI 값을 이용해서 전송전력을 수정하는 단계로 구성된다.

3.1 이진검색 기반 전송전력 설정 단계

TPC-BS는 2단계 과정으로 전송전력을 다룬다. 먼저 어떤 노드에서 전송할 데이터를 가졌을 때 노드의 로컬 전송전력 테이블을 검색해서 목적 노드의 전송전력을 찾는다. 로컬 전송전력 테이블은 각각의 모든 이웃 노드에 대해 알맞은 전송전력을 저장해두는 곳으로 한번 저장된 값은 일정 시간이 지나면 자동으로 삭제되는 연성-상태 특징을 갖는다. 전송전력 테이블에서 목적 노드의 전송전력 값을 찾지 못했을 때는 이진검색 방법을 이용한 전송전력 찾기를 수행한다. 이때 사용하는 프레임은 IEEE 802.15.4 표준에서 사용하는 MAC 명령어 프레임을 수정해서 사용한다. MAC 명령어 프레임은 목적 노드를 찾기 위해 특정 전송전력 값을 노드의 전송전력 테이블에 기록한 후 방송모드로 전송된다. 방송모드 전송 메시지에 대해 하나 이상의 응답을 수신하면 단일전송모드로 하나씩 목적 노드와 송수신하여 전송전력 값을 설정한다. 이 과정에서 이진검색 방법이 사용되어 빠르게 최적 전송전력을 결정할 수 있도록 한다. 만일 응답 메시지를 전혀 수신하지 못할 경우에는 전송전력을 2배로 올리고 방송모드로 전송한다. 그림 1은 TPC-BS의 이진검색에 의한 전송전력 결정 과정이다.

이웃노드에 대해 전송전력을 결정할 때 기존의 일부 연구[15,121,22]들은 값을 변경하는 과정에 대해 자세한 설명을 제시하지 않는 경우가 대부분이고 일부 연구에서 무선 모뎀이 지원하는 범위에 대해 일정

Algorithm 1. 노드 A의 전송전력 결정을 위한 슈더코드

1. In node A, $P_{tx} = middleVlaueOfBinarySearch(low, high)$ then
Send Ptx frame in broadcast mode
2. In node B, receive Ptx frame, then send back Ack frame to node A
 - 3-1. If node A receive Ack from B, then store Ptx for B in the local transmission power table then goto 4
 - 3-2. If node A doesn't receive any Ack frame, then
 $P_{tx} = middleVlaueOfBinarySearch(P_{tx}, high)$
Send Ptx frame in broadcast mode
Goto 2
4. If node A receive Ack from B or C, then store Ptx for B or C in the local transmission power table
5. In node A, calculate new $P_{tx} = middleVlaueOfBinarySearch(low, P_{tx})$
Send Ptx frame in unicast mode
Goto 2

그림 1. 이진검색을 이용한 전송전력 결정 과정

한 단위로 증감하는 방법을 사용하고 있다. 이것은 최적 값을 찾는데 전송해야 할 패킷의 개수가 무선 모뎀이 지원하는 값의 범위에 비례해서 증가하고 더 불어서 전송전력 값을 결정하는데 필요한 시간이 증가한다. 이진검색 방법을 적용한 TPC-BS는 이러한 단점을 모두 극복할 수 있다. 전송전력 테이블에 등록된 전송전력 값은 각각의 이웃 노드로 단일전송 모드로 패킷을 보낼 때 사용되고, 방송모드로 패킷을 보낼 때는 전송전력 테이블에 등록된 값 중에서 최댓값을 사용한다.

알고리즘 1은 그림 1에서 이진검색 방법을 이용해서 전송전력을 결정하는 과정이다. 모뎀에서 지원하는 최소, 최대 전송전력을 기반으로 중간 값을 P_{tx} 로 결정하고, 방송모드로 시험 패킷을 이웃으로 전송한다(줄 1). P_{tx} 전송전력을 이용한 전송에서 패킷을 수신하는 노드는 Ack 회신을 소스 노드로 보내고,

소스 노드는 현재 P_{tx} 를 기록한다(줄 2, 3-1). 만일 정해진 시간동안 Ack가 돌아오지 않는다면 현재 P_{tx} 가 너무 작은 값이므로 P_{tx} 를 증가하고 다시 전송해야 한다(줄 3-2). Ack가 수신된 노드는 P_{tx} 전송 범위 내에 있는 노드이므로 더 작은 P_{tx} 로 송수신이 가능할 수 있다. 따라서 P_{tx} 를 감소한 후 시험 패킷을 전송해 보아야 한다(줄 4, 5).

3.2 동적 전송전력 추적 및 변경 단계

전송전력을 설정할 때 노드간의 무선 상태를 반영 하였지만 날씨와 방해물 등 다양한 이유로 무선 상태가 변화하므로 한번 설정된 전송전력이 지속적으로 최적화 상태를 유지할 수 없다. 따라서 전송전력을 조절하는 모든 방법은 지속적으로 무선 상태를 반영해서 전송전력을 변해야 한다. TPC-BS는 추가 부담 없이 데이터 패킷을 송수신할 때 무선 상태를 측정해서 동적으로 전송전력 값을 조정한다. TPC-BS는 ACK 응답 프레임을 수정해서 수신 노드가 측정한 RSSI 값을 송신 노드로 전달한다.

그림 2는 TPC-BS에서 RSSI 정보를 추가하여 수정한 ACK 프레임이다. RSSI 정보와 함께 TPC-BS

그림 2. 변경된 IEEE 802.15.4 ACK 프레임

는 수신 노드의 좌표 값을 함께 전송한다. 참고로 우리는 모든 센서 노드가 자신의 위치정보를 알고 있다고 가정한다. 노드의 위치는 GPS와 같은 장치에 의해 결정될 수 있으며, 하드웨어 장치의 도움 없이 노드의 위치를 결정할 수 있는 많은 방법[23,24]들이 소개되고 있다. RSSI는 무선 전파의 수신 상태를 표시하는 정보이며 노드에서 패킷이 수신될 때 손쉽게 얻을 수 있다. RSSI는 주변 환경에 따라 변화하므로 반드시 노드간 거리에 비례하지 않으나 노드의 이동이나 장애물의 이동 등 동적으로 변화하는 무선 상태를 나타내는 정보로 활용하기 쉽다. 다음은 TPC-BS의 전송전력 결정 계산과정으로 송신/수신 노드의 위치정보를 이용해서 두 노드간 거리 d 를 계산한 후 동적으로 전송전력을 조정하는 과정이다. 경로 손실은 전자기파가 공간을 통해 전송되는 중에 발생하는 에너지의 감쇄이다. RF 신호의 자유공간 감쇄 값의 계산식은 [25]에서 참고하였다.

$$P_{\text{loss}} = (4\pi d / \lambda)^2 \quad (1)$$

λ 는 파장이고 d 는 거리이다. 식 1은 신호가 전파될 때 적용되는 에너지 감쇄를 나타낸다. 이식을 간단히 하기위해 다음 식 2와 같이 데시벨을 이용하도록 변환 된다:

$$P_{\text{loss}} = 32.4 + 20\log_{10}d + 20\log_{10}f \quad (2)$$

Where:

- 32.4 = 상실 계수 (reference loss constant)
- d = 거리 (Kilometers)
- f = 주파수 (MHz)

2.4GHz 주파수를 이용하는 무선 시스템에 맞추어 거리 단위를 미터로 바꾸고 정리한다.

$$P_{\text{loss}} = 40 + 20\log_{10}d \quad (3)$$

Algorithm 2. 경로 손실에 의한 전송전력 계산

1. current path loss: P_{loss}
2. $\alpha = P_{\text{tx}} - P_{\text{loss}}$
3. $\beta = P_{\text{rx}} - P_{\text{threshold}}$
4. new transmission power $P_{\text{new_tx}} = P_{\text{tx}} - (\alpha * \beta / P_{\text{rx}})$

Where:

- α = 수신노드에서 이론적 RSSI 기대 값
- β = 실제 RSSI와 수신된 임계치의 차이 값
- $P_{\text{threshold}}$ = 오류없이 데이터를 수신할 수 있는

임계치

○ $P_{\text{tx}} / P_{\text{rx}}$ = 송신 / 수신 파워 (dB)

○ $P_{\text{new_tx}}$ = 수정된 전송전력 값

β 는 수신된 신호의 RSSI 값 중에 수신 임계치를 초과한 값이다. β 값은 전송전력에서 제거해도 상관 없는 여유분으로 볼 수 있고, 실제 경로 손실을 측정한 후 현재의 전송전력 값에 대해 일정한 비율로 더하거나 감소해서 새 전송전력을 결정할 수 있다. 참고로, 논의를 간단히 하기 위해 본 논문에서는 감쇄 (attenuation), 잡음(noise), 다중경로(multipath) 등의 다른 요소는 고려하지 않았다.

알고리즘 2에 따라 동적으로 노드간 감쇄 값이 계산되고 현재 설정된 전송전력 값이 수정된다. 새 전송전력 값은 이론적으로 기대할 수 있는 수신 강도인 α 와 한계 값을 고려한 최소 전송전력인 β 를 바탕으로 일정비율의 여유 값을 감안한 후 과다하게 적용된 전송전력을 감소시켜서 결정된다. 이렇게 동적으로 전송전력을 결정하는 것은 RSSI가 같은 거리에서도 상태에 따라 변하기 때문이다.

4. 실험 및 분석

4.1 실험 환경

본 논문에서 제안하는 TPC-BS의 성능을 평가하기 위해 Qualnet[26]을 이용한 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 아래 표 1과 같고, 3개의 프로토콜을 비교 실험하였다. IEEE 802.15.4 표준과 IEEE 802.15.4+BS는 이진검색 기법에 의해 전송전력을 결정하는 기능만 가진 프로토콜이고, IEEE 802.15.4+BS+ACK는 RSSI의 변화를 추적해서 동적으로 전송전력을 변경하는 기능까지 구현된 것이다. 참고로, IEEE 802.15.4+BS+ACK는 TPC-BS로 명

표 1. 시뮬레이션 구성요소

구성요소	값
범위(m)	200×200
노드갯수	50/70/90 w/Random
트래픽	64바이트 CBR, 2초 간격
트래픽 갯수	10/15/20
초기 파워(dBm)	-10
실험시간(s)	3600

그림 3. 노드 배치 모델: 싱크노드가 없는 경우(좌)와 싱크노드가 있는 경우(우)

청을 정하였고 제한된 모든 기능을 갖고 있다. 그림 3은 실험에 사용된 두 가지 노드 구성을 예시하고 있다. 왼쪽의 노드 구성은 싱크노드가 없는 애드-혹 구성이고, 오른쪽 노드 구성은 하나의 싱크노드를 갖고 있으며 싱크노드는 모든 트래픽의 목적지 노드로 사용되므로 싱크노드 주변은 패킷 충돌이 발생할 가능성이 높은 지역 즉 깔때기 효과가 나타나는 곳이 된다.

4.2 싱크노드가 없는 환경의 실험

첫 번째 실험군은 TPC-BS를 비롯한 3가지 MAC 프로토콜을 대상으로 10, 15, 20개의 CBR을 연결하여 실시했다. 표 1에서 볼 수 있듯이 배치된 노드의 개수는 50, 70, 90개 이고, 트래픽과 노드의 밀집으로 발생한 전파장애의 변화와 이에 따른 에너지 소비, 전달율, 단위 에너지별 데이터 전송 등 성능을 평가하였다.

그림 4는 IEEE 802.15.4.+BS와 IEEE 802.15.4.+BS+ACK의 전송전력 변화를 시간에 따라 보여주고 있다. 그림에서 네트워크 단위로 설정된 하나의 전송전력이 변화되면서 다양한 파워 값이 사용되는 것을 확인할 수 있다. 전송전력의 초기 기준치로 사용된 -10dBm보다 작은 값이 사용될수록 네트워크의 에너지 소비는 감소하며, 전송전력을 동적으로 제어할 필요성을 보여준다. 또한 802.15.4.+BS+ACK는 노드 개수의 변화에 관계없이 초기 값 설정에 별다른 영향이 없는 것으로 보인다. 그러나 네트워크에 참여하는 노드 개수가 증가함에 따라 802.15.4.+BS+ACK의 전송전력의 재설정치가 증가한다는 것을 확인할 수 있는

그림 4. 전송전력의 변화: 싱크노드가 없는 90개 노드에 IEEE 802.15.4.+BS(상)와 IEEE 802.15.4.+BS+ACK(하)

데 이것은 노드간 상호 간섭이 증가하면서 발행하는 것으로 보인다.

그림 5-a는 15개의 CBR 응용을 사용했을 때 3가지 프로토콜의 에너지 소비량을 기록한 것이다. IEEE 802.15.4.+BS+ACK가 전송전력 설정을 위해 초기에 사용한 소량의 추가 패킷의 영향과 비콘 메시지의 증가, 전송전력 추적을 위한 동작 때문에 가장 많은 에너지를 소비했다. 그림 5-b는 802.15.4.+BS+ACK가 전송전력 추적을 잘 하고 있음을 보이는 결과이다. 802.15.4.+BS+ACK는 가장 뛰어난 단위 에너지량 대비 데이터 전송량을 기록했고, 그것은 전송전력 추적이 효과적임을 의미하며 동일한 데이터량을 전송

a) 15개 CBR의 에너지 소비

b) 15개 CBR의 단위 에너지 당 데이터 전송량

c) 15개 CBR의 처리율

그림 5. 싱크노드가 없는 15개 CBR의 성능

할 때 가장 적은 에너지를 소비한다. 그림 5-c는 3가지 프로토콜의 처리율이다. 802.15.4+BS+ACK의 처리율이 가장 높고, 노드 갯수가 증가함에 따라 노드 간의 전파장에도 증가하므로 더 많은 에너지가 소비됨에도 불구하고 처리율은 낮아진다. 그러나 802.15.4+BS+ACK가 가장 낮은 감소율로 우수한 성능을 보여주었다.

4.3 싱크노드가 있는 환경의 실험

두 번째 실험군은 모든 조건이 동일한 환경에 싱크노드가 하나 추가된 것이다. 이 실험을 통해 데이

터 전송이 네트워크 전역에 흩어져서 사용될 때와 하나의 싱크노드를 향해서 모든 트래픽이 집중될 때 전송전력의 변화를 살펴본다. 이러한 환경에서 모든 트래픽은 싱크노드가 모든 트래픽을 수신하므로 깔때기(funnel) 효과를 겪는다. 깔때기 효과는 싱크노드와 이웃노드에 점점 더 많은 충돌이 발생하고 더 많은 에너지를 사용하게 된다는 것이다.

그림 6은 20개의 CBR 트래픽과 하나의 싱크노드가 있을 때 전송전력의 변화이다. 802.15.4+BS+ACK는 많은 전송전력의 변화를 보여주고, 그림 4의 싱크노드가 없을 때보다 깔때기 효과에 의해 더 많은 변화가 있음을 보여주었다. 초기 설정 값 -10dBm보다 낮은 값들은 실제 노드간 거리가 더 짧은 것을 의미하며 전송전력 조정 필요성을 보여준다. 아래쪽 그래프에서 실험시간 동안 지속적으로 전송전력 변화가 발생했고 이것은 ACK 신호를 통해 전달된 실제 수신 RSSI 값의 변화가 지속적으로 발생함을 의미한다.

그림 7-a는 20개 CBR과 하나의 싱크노드로 구성된 실험군에서 3가지 프로토콜의 에너지 소비량으로 IEEE 802.15.4+BS+ACK가 가장 좋은 에너지 효율임을 보여주었다. 이것은 그림 5-a에서 싱크노드가 없을 때 IEEE 802.15.4+BS+ACK의 에너지 소비가 가장 많았던 것과 반대 결과이다. 싱크노드가 있을 때 깔때기 효과 때문에 모든 트래픽이 싱크노드로 집결될 때 발생하는 충돌과 에너지 소비의 비균등화

그림 6. 전송전력의 변화; 하나의 싱크노드가 있는 90개 노드에 IEEE 802.15.4+BS(상)와 IEEE 802.15.4+BS+ACK(하)

a) 20개 CBR의 에너지 소비

b) 20개 CBR의 단위 에너지 당 데이터 전송량

c) 20개 CBR의 처리율

그림 7. 싱크노드와 20개 CBR의 성능

가 전체 네트워크의 에너지 소비에 영향을 주고 있는 것이다. 많은 센서 네트워크가 환경 모니터링 등의 응용환경에서 싱크노드를 갖고 구성되므로 이것은 TPC-BS가 실질적으로 성능향상을 제공할 수 있음을 의미한다. 그림 7-b와 c는 각각 단위 에너지 당 데이터 전송량과 처리율이다. 그림 7-c에서 IEEE 802.15.4+BS+ACK은 높은 처리율과 함께 적절한 전송전력 조절을 제공할 수 있다.

4.3 이동 노드 환경의 실험

노드의 이동이 가능한 환경을 실험하기 위해 50개

의 노드와 20개의 CBR 응용을 사용해서 실험 환경을 구성했다. 실험은 싱크노드의 존재 여부에 따라 구분되고, 싱크노드를 제외한 모든 노드가 실험시작 100s 후에 이동을 시작하고, 노드의 이동 방향은 무작위로 선택된다.

그림 8에서 윗줄 두개의 그림은 싱크노드가 없을 때 전송전력 변화이다. 좌상의 그림은 IEEE 802.15.4+BS이고 오른쪽 그림은 IEEE 802.15.4+BS+ACK 프로토콜이다. 아래쪽 두개의 그림은 싱크노드가 있을 때이며 각각 IEEE 802.15.4+BS와 IEEE 802.15.4+BS+ACK의 전송전력 변화이다. 오른쪽 상하 두개의 그림은 IEEE 802.15.4+BS+ACK 프로토콜에 대해 그림 4, 6과 다르게 노드의 이동성 때문에 더 많은 전송전력 변화를 보여주고 있다. 또한 싱크노드가 없을 때 더 많은 상태변화가 발생했음을 보여주고, 대부분의 변화가 -10dBm 근처에서 발생하였는데 이것은 노드의 이동성이 링크의 상실과 재연결을 유발해서 파워를 재설정하도록 했음을 나타낸다. 우하의 그림은 실험에서 싱크노드가 움직이지 않고 고정됨으로써 싱크노드와 다른 노드간에 위치 변화가 상대적으로 애드-혹 방식을 사용한 우상의 그림보다 더 낮은 빈도를 기록했다.

그림 9-a는 노드 이동성이 적용됐을 때 각 네트워크의 에너지 소비량이다. IEEE 802.15.4+BS는 노드 이동 때문에 발생한 전송전력 설정을 위한 시험 패킷이 없어서 가장 낮은 에너지 소비를 보였다. 앞에서의 에너지 소비량과 마찬가지로 싱크노드가 있는 경우에 모든 프로토콜에 대해 더 많은 에너지 소비가 있었다. 그림 8에서 싱크노드가 없을 때 더 많은 전송전력 변경이 발생했음을 감안하면 애드-혹 방식의 네트워크에서는 노드간 위치 변화가 상대적으로 더 심하고, 싱크노드가 있는 경우에는 목적지 노드인 싱크노드가 고정된 상태에서 위치의 변화가 더 작아서 전송전력 설정 빈도가 낮아진다. 그림 9-b, c는 싱크노드가 있을 때 처리율과 단위 에너지 당 전송된 데이터 바이트 수가 더 좋은 상태임을 보여준다. 이동 노드 실험을 통해 동적 전송전력 변경이 에너지 소비와 처리율 관점에서 노드 이동성 환경에서 더 적합하게 동작함을 보여주는 결과이다.

5. 결 론

센서 네트워크의 생명을 연장하기 위해서 배터리

그림 8. 이동 노드에 대한 전송전력 변화

a) 이동 노드의 에너지 소비

b) 이동 노드의 단위 에너지 당 데이터 전송량

c) 이동 노드의 처리율

그림 9. 싱크노드와 50개 이동노드의 성능

소모를 최적화하여는 노력의 일환으로 본 논문을 통해 우리는 이진검색 기법을 이용해서 빠르고 오버헤드가 작은 출발-목적지 쌍 기반의 전송전력 결정 기법과 동적 무선상태 반영 알고리즘으로 구성된 TPC-BS를 제안하였다. TPC-BS는 네트워크 초기화 과정에서 사용된 초기 값은 네트워크의 시간적 공간적 재사용성을 나쁘게 하거나 과도한 도달거리로 부작용을 발생시킬 수 있으므로 노드가 거리에 알맞은 전송전력을 소스-목적지 쌍별로 설정한다. 이때 이진검색 기법을 활용해서 알맞은 전송전력 값을 찾기 위해 전송하는 시험 패킷의 개수를 최적화함으로써 오버헤드를 최소화한다. 네트워크가 운영되는 도중에도 네트워크의 전파 상태는 끊임없이 변화하므로 한번 정해진 전송전력을 계속 사용하지 않고 지속적으로 전송전력을 추적하고 조정한다. 본 논문은 에너지 소비와 처리율을 다루는 후속 MAC 프로토콜 연구의 중간결과이며 음향채널을 이용하는 수 중에서 MAC 프로토콜의 동작을 분석하는 과정의 역할을 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Chan-Sik Jeon, Min-Jae Lee, and Seung-Hyun Oh, "A Design and Implementation of Ubiquitous Campus Environment Information Service," IEEE, 2008 International Conference on Advanced Language Processing and Web Information Technology, ALPIT, pp. 362-366,

- 2008.
- [2] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," ACM SENSYS'04 Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 95-107, 2004.
- [3] "IEEE Standard for part 15.4 : Wireless Medium Access Control Layer(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANS)," 2006.
- [4] David B. Green and M. S. Obaidat, "An Accurate Line of Sight Propagation Performance Model for Ad Hoc 802.11 Wireless LAN (WLAN) Devices," *IEEE Personal Communications*, pp. 3424-3428, 2002.
- [5] V. Kawadia, S. Narayanaswamy, R. S. Sreenivas, R. Rozovsky, and P.R. Kumar, "Protocols for Media Access Control and Power Control in Wireless Networks," In 40th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1935-1940, 2001.
- [6] J. Liu and B. Li, "MobileGrid: Capacity-Aware Topology Control in Mobile Ad Hoc Networks," In IEEE ICCCN, pp.570-574, 2002.
- [7] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, and P. R. Kumar, "Power Control in Ad Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol," In European Wireless Conference, pp.156-162, 2002.
- [8] S. J. Park and R. Sivakumar, "Load-Sensitive Transmission Power Control in Wireless Ad-hoc Networks," In IEEE GlobeCom, Vol.1, pp. 42-46, 2002.
- [9] R. Ramanathan and R. R-Hain, "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," In IEEE INFOCOM, Vol.2, pp. 404-413, 2000.
- [10] Bong Gi Song and Chong Ho Woo, "Extension of Wireless Sensor Network Lifetime with Variable Sensing Range Using Genetic Algorithm," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.12, No.5, pp. 728-736, 2009
- [11] Bergamo, P. and Mazzini, G., "Localization in Sensor Networks With Fading and Mobility," In The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Vol.2, pp. 750-754 2002.
- [12] R.Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y.M.Wang, "Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks," In IEEE INFOCOM, pp. 1388-1397, 2001.
- [13] D. Son, B. Krishnamachari, and J. Heidemann, "Experimental Study of the Effects of Transmission Power Control and Blacklisting in Wireless Sensor Networks," IEEE SECON, 2004.
- [14] X. Y. Li, P. J. Wan, Y. Wang, and O. Frieder, "Sparse Power Efficient Topology for Wireless Networks," In HICSS, 2002.
- [15] S. Lin, J. Zhang, L. Gu, T. He, and J. Stankovic, "ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks," In Proceedings of SenSys'06, 2006.
- [16] D. Blough, M. Leoncini, G. Resta, and P. Santi, "The k-Neigh Protocol for Symmetric Topology Control in Ad Hoc Networks," In ACM MobiHoc, pp. 141-152, 2003.
- [17] C. Bettstetter, "On the Connectivity of Wireless Multihop Networks with Homogeneous and Inhomogeneous Range Assignment," In IEEE VTC, Vol.3, pp. 1706-1710, 2002.
- [18] L. M. Kirousis, E. Kranakis, D. Krizanc, and A. Pelc, "Power Consumption in Packet Radio Networks," In Theoretical Computer Science, Vol.243, pp. 289-305, 2000.
- [19] S. J. Park and R. Sivakumar, "Quantitative Analysis of Transmission Power Control in Wireless Ad-hoc Networks," In IWAHN, pp. 56-63, 2002.
- [20] V. Rodoplu and T. H. Meng, "Minimum Energy Mobile Wireless Networks," In *IEEE*

- JSAC*, Vol.17, pp. 1333-1344, 1999.
- [21] M. Kubisch, H. Karl, A. Wolisz, L. C. Zhong, and J. M. Rabaey, "Distributed Algorithms for Transmission Power Control in Wireless Sensor Networks," In *IEEE WCNC*, 2003.
- [22] P. Santi and D. M. Blough, "The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks," In *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.2, pp. 25-39, 2003.
- [23] F. Xue and P. R. Kumar, "The Number of Neighbors Needed for Connectivity of Wireless Networks," In *Wireless Networks*, Vol. 10, pp. 169-181, 2004.
- [24] J. Kim, S. Chang, and Y. Kwon, "ODTPC: On-demand Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks," *Proc. ICOIN*, Pusan, Korea, 2008.
- [25] Correia, L.H.A, Nogueira, and J.M.S, "Transmission Power Control Techniques for MAC Protocols in Wireless Sensor Networks," *IEEE, Network Operations and Management Symposium*, pp. 1049-1054, 2008.
- [26] Crossbow Technology Inc; <http://www.xbow.com>.

오 승 현

1988년 동국대학교 전자계산학과 (학사)
 1998년 동국대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 2001년 동국대학교 컴퓨터공학과 (박사)

1987년~1996년 (주)대우엔지니어링
 2002년~현재 동국대학교 컴퓨터공학부 부교수
 관심분야: 실시간 프로토콜, 차세대 네트워크, 센서 네트워크