

무선 센서 네트워크에서의 파워 컨트롤 기법에 관한 연구

이동호^o, 이한선, 최웅철, 이승형, 정광수
광운대학교 전자통신공학과 컴퓨터통신연구실

{dhlee^o, hslee}@adams.kw.ac.kr, {wchoi, shrlee, kchung}@kw.ac.kr

A Study on the Power Control Mechanism in Wireless Sensor Networks

Dongho Lee^o, Hansun Lee, WoongChul Choi, Seunghyong Rhee, Kwangsue Chung
School of Electronics Engineering, Kwangwoon Univ.

요 약

무선 센서 네트워크에서는 에너지 제약이라는 특징 때문에 에너지 효율과 관련된 많은 연구가 진행되고 있지만 대부분의 연구는 에너지를 보존하기 위해 센서노드의 작업을 줄이는 소극적인 방식을 취한다. 이에 반해 파워 컨트롤 기법은 전송 파워를 조절하여 불필요한 에너지 소모를 줄이는 적극적인 방식이다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 클러스터 기반 라우팅 프로토콜인 LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)에 파워 컨트롤 기법을 적용한 LEACH-PC(LEACH-Power Control)를 제안하였다. LEACH-PC는 클러스터 구성에 사용한 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 정보를 이용하여 클러스터 내부 통신 단계에서 파워 컨트롤을 수행한다. LEACH-PC는 에너지 효율성 측면에서 기존의 LEACH 보다 좋은 성능을 보임을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

1. 서 론

최근의 무선 통신과 전자 공학의 진보는 저 비용, 저 전력의 무선 센서 네트워크 개발을 가능케 했다. 무선 센서 네트워크란 기존의 센서 기술과 무선 통신 기술을 접목시킨 기술로 센서에서 측정된 정보를 센서 노드의 프로세서에서 연산 후 가공하여 이를 무선 송수신기를 통해 전송하는 기술이다. 이러한 무선 센서 네트워크는 기존의 네트워크와 같은 의사소통의 수단이 아니라 다수의 센서 노드를 이용하여 환경의 변화, 수질 오염, 지진 활동, 건물의 구조적 상태 등에 대한 정보를 수집하는 것을 목적으로 한다[1].

무선 센서 네트워크에서의 각 센서 노드는 초소형의 전자 기기로 만들어지기 때문에 전력 공급에 제한이 따르게 된다. 무선 센서 네트워크 응용의 특성상 대부분의 경우 센서 노드 전력의 재충전이 불가능하기 때문에 센서 노드의 수명은 배터리의 수명에 의존적이다. 특히 멀리 전송이 필요한 무선 센서 네트워크에서는 각 노드가 데이터의 생성자이면서 동시에 라우터 역할을 해야 하므로 센서 노드의 에너지 고갈은 네트워크 구성에 큰 영향을 미치게 된다. 이와 같은 문제로 무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율에 관한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다[2].

무선 센서 네트워크에서의 에너지의 소모는 무선 송수신기의 전원 작동이나 캐리어 센싱, 데이터 송수신에서 주로 발생한다. 따라서 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적 기법은 일반적으로 무선 송수신기를 사용하지 않을 때 전원을 차단하거나 불필요한 캐리어 센싱을 줄임으로써 에너지 소모를 줄인다. 이는 무선 송수신기의 사용 시간을 줄여 에너지의 소모를 회피하는 소극적인 방식의 에너지 효율 기법이라 할 수 있고, 이와 달리 데이터 송수신에 사용되는 실질적인 에너지의 소비량을 감소시키는 적극적인 에너지 효율 기법으로 파워 컨트롤을 들 수 있다. 파워 컨트롤 기법이란 데이터 전송 시 무선 송수신기의 기본 값인 최대 파워 레벨을 사용하는 것이 아니라 목적지에 도달할 수 있는 적절한 파워 강도로 조절하여 보냄으로써 에너지의 소모를 줄이는 방식이다[3].

무선 센서 네트워크에서의 파워 컨트롤 기법 적용은 많은 장점을 가져온다. 각 센서 노드의 파워 소모를 줄여 평균 배터리 수명을 연장 시킬 수 있고, 그에 따라 전체 네트워크의 에너지 소모를 줄일 수 있을 뿐 아니라 노드간의 전송 범위에 따른 간섭을 최소화하여 무선 채널을 효율적으로 공유 할 수 있다[4].

무선 센서 네트워크에서 제안된 에너지 효율적인 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜로 LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)가 있다[5]. LEACH는 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 기반으로 하는 클러스터 구성 방식을 사용하기 때문에 파워 조절의 척도가 필요한 파워 컨트롤 기법을 적용하기에 적합하다. 따라서 본 논문에서는 LEACH에 파워 컨트롤 기법을 적

*본 연구는 한국 과학재단 특정기초연구[R01-2005-0000-10934-0(2006)]의 지원에 의해 수행되었음.

용한 LEACH-PC(LEACH-Power Control)를 제안하였고 실험을 통해 에너지 효율적임을 확인하였다.

논문의 2장에서는 파워 컨트롤과 LEACH의 동작 방식에 대한 관련 연구를 기술하였고 3장에서는 LEACH에 파워 컨트롤 기법을 적용하여 고안한 LEACH-PC에 대해 설명하였다. 4장에서는 LEACH-PC를 실험을 통해 성능을 평가하였으며 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

2. 관련 연구

본 장에서는 파워 컨트롤의 다양한 방식에 대해 소개하고 파워 컨트롤의 연구 방향에 대해 기술하였다. 또한 본 논문에서 제안하는 LEACH-PC의 근간이 되는 LEACH 프로토콜의 동작 방식에 대해 기술하였다.

2.1 파워 컨트롤 기법

파워 컨트롤 기법은 다양한 방식으로 분류가 가능하다. 첫 번째로 수신 노드의 피드백 정보 전달 유무에 따라 Open Loop와 Closed Loop로 구분할 수 있다. Open Loop는 자신이 수신한 파워에 근거하여 송신 노드에게 전송할 파워를 조절하는 방식이고, Closed Loop는 수신 노드가 수신한 파워를 측정하고 송신 노드에게 알려서 이를 통해 송신 노드가 송신 파워를 조절하도록 하는 방식이다. 무선 환경의 다중 경로 페이딩을 극복하기 위해서는 피드백 정보를 사용하는 Closed Loop가 더 효율적이다[4].

두 번째는 파워 조절의 척도에 따른 구분으로 다양한 네트워크 정보 및 지표를 이용하여 파워 조절의 근거로 사용할 수 있다. PCBL(Power Control with Blacklisting) 알고리즘은 각 파워 레벨에 따른 수신측의 패킷 수신율을 통해 파워를 조절한다[6]. 애드혹 네트워크에서 라우팅에 파워 컨트롤 기법을 적용한 COMPOW(Common Power) 알고리즘은 파워 레벨별로 라우팅 테이블을 생성하여 네트워크 연결성을 유지하는 최소한의 파워 레벨을 찾아내서 그것을 네트워크에서 사용할 공통 파워로 설정한다[3]. 또한 RSSI, SIR(Signal to Interference Ratio), BER(Bit Error Rate)과 같은 물리 계층의 측정 정보를 이용하여 파워 조절의 정도를 결정할 수 있다. PCSMAC(Power Controlled Sensor MAC) 프로토콜은 수신 노드의 RSSI 정보를 피드백 하여 전송 파워를 조절한다[4]. 본 논문에서 제안한 LEACH-PC는 RSSI 정보를 이용해 Open Loop 방식과 Closed Loop 방식을 혼합하여 파워 조절을 수행하게 된다.

기존의 파워 컨트롤을 연구는 크게 두 가지 방향으로 이루어져 왔다. 네트워크 수명과 에너지 효율성을 고려하는 것이 기초적인 연구 방향이고, 전송 파워 레벨과 무선 채널의 이용성과의 관계에 대한 연구 또한 많이 이루어지고 있다. 반면에 송신 파워를 강하게 조절해서 비신뢰적인 링크를 신뢰적인 링크로 변경시켜 링크의 품질을 조절하는 접근 방식도 존재한다[6].

2.2 LEACH의 동작 방식

무선 센서 네트워크의 특성에 적합한 많은 라우팅 프로토콜이 제안되었고 연구도 활발히 진행되고 있다. 구분 방식으로는 프로액티브와 리액티브, 또는 일반적인 구조와 클러스터링 구조, 위치정보 수반 유무 등으로 구분지어질 수 있다. 가능하다면 동적으로 클러스터를 구성하여 라우팅을 하는 것이 에너지 소비측면에서 효율적이다[7]. 무선 센서 네트워크에서 동적 클러스터 기반 라우팅 프로토콜의 대표적인 예로 LEACH를 들 수 있다.

LEACH 프로토콜의 동작 방식은 그림 1과 같이 타임라인(라운드)으로 설명할 수 있다. 라운드는 크게 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계는 셋업 단계로 세부적으로는 광고 단계와 클러스터 셋업 단계로 나누어진다. 광고 단계에서는 주어진 시간에 어떤 확률로써 로컬 클러스터 헤드를 스스로 선출하고 선출된 로컬 클러스터 헤드 노드들은 그들의 상태를 자신의 영역범위에서 브로드캐스팅 한다. 클러스터 셋업 단계에서는 클러스터 헤드 노드의 브로드캐스팅 메시지를 수신한 이웃 노드들의 RSSI 정보에 기반하여 자신과 가까운 클러스터 헤드를 선택함으로써 어떤 클러스터에 속할지를 결정하고 이런 과정을 통해 클러스터가 형성된다.

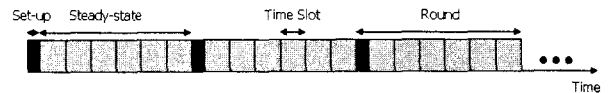


그림 1. LEACH의 타임라인

두 번째 단계인 Steady-state 단계는 다시 스케줄 생성 단계와 데이터 전송 단계로 나눌 수 있다. 스케줄 생성 단계에서는 클러스터 헤드 노드가 자신이 관리할 구성원 노드의 스케줄을 생성하고 브로드캐스팅을 한다. 데이터 전송 단계에서는 클러스터 헤드 노드와 클러스터 구성원 사이에 TDMA(Time Division Multiple Access) 기반의 통신을 수행한다. 각 구성원 노드는 자신의 타임 슬롯에 해당하는 시간에만 데이터를 전송하고 나머지 시간에는 슬립 상태를 유지할 수 있다. 클러스터 내부 통신을 마치면 클러스터 헤드 노드는 각 노드로부터 받은 데이터를 집합하고 압축하여 싱크 노드에게 전송한다. 이와 같이 한 라운드를 마친 후 다시 클러스터 헤드 노드 선출 과정부터 되풀이하게 된다[5].

LEACH는 많은 논문의 기초가 되는 프로토콜이지만 싱크와 가까운 노드에서의 에너지 소모가 많은 핫스팟 문제가 단점으로 지적된다. 또한 파워 컨트롤이라는 적극적인 에너지 효율 기법이 존재하지 않는다. 따라서 LEACH에 파워 컨트롤 기법을 적용 시킨다면 에너지 효율 측면에서 더 좋은 성능을 발휘할 것이다.

3. LEACH-PC

앞 장에서 살펴본 바와 같이 LEACH에서는 클러스터를 구성할 때 RSSI에 기반하여 전송 범위를 고려한 클러스터를 구성하게 된다. 하지만 그 후 클러스터 헤드 노

드와 클러스터 구성원 노드 사이의 TDMA 통신 동안에는 기본적인 파워로 전송을 하게 되기 때문에 불필요한 에너지 소모가 발생하고 이에 따라 네트워크의 수명도 줄어들게 된다. 따라서 클러스터 구성 시에 고려한 RSSI를 이용하여 그에 해당하는 적당한 파워 레벨을 찾아내서 클러스터 내부의 통신에 사용하는 것이 에너지 효율성 측면에서 장점을 가질 수 있다. 따라서 LEACH에 파워 컨트롤 기법을 접목시킨 LEACH-PC를 제안하고자 한다.

제안하는 LEACH-PC는 다음 세 가지 가정을 기반으로 하고 있다. 첫째는 물리 계층은 상위 계층에서 통지한 파워 레벨로 즉시 프레임 전송할 수 있는 것이고 두 번째는 물리 계층은 수신한 프레임에 대한 RSSI 정보를 상위 계층으로 통지할 수 있다는 것이다. 그리고 마지막 가정으로는 무선 링크는 양방향성을 지니고 대칭적이라는 것이다.

LEACH-PC의 동작 방식은 기본적으로 LEACH의 동작 방식을 따른다. 첫 단계는 셋업 단계로 LEACH에서 사용한 계산 방법을 통해 클러스터 헤드에 해당하는 노드를 선출하고 선출된 각 클러스터 헤드 노드는 최대 파워 레벨로 브로드캐스트 메시지를 주변에 전송한다. 이 메시지를 받은 주변의 노드는 메시지를 수신할 때의 RSSI를 계산하여 그 값을 ACK(Acknowledgment) 메시지와 함께 클러스터 헤드 노드에게 전송하게 된다. ACK 메시지의 전송 또한 최대 파워 레벨을 이용한다. 각 노드의 ACK 메시지를 수신한 클러스터 헤드 노드는 각 노드의 RSSI를 수집하여 저장하고 LEACH와 같은 방식으로 클러스터를 구성한다.

두 번째 단계인 Steady-state 단계에서 실질적인 파워 컨트롤이 수행된다. 클러스터 헤드 노드는 클러스터 구성원들과 통신하기 위해 TDMA 스케줄을 생성하게 되는데 이 과정에서 클러스터 헤드는 클러스터 구성원들이 전송했던 RSSI의 최대값에 해당하는 파워 레벨을 계산하여 클러스터 헤드 노드의 파워 레벨로 설정한다. 수신 노드의 피드백 정보에 의해 수행되는 클러스터 헤드의 파워 컨트롤은 Closed Loop 방식이다.

클러스터 헤드 노드의 파워 레벨이 결정되면 계산된 파워 레벨로 클러스터 헤드 노드의 송신 파워를 조절하고 브로드캐스트 메시지에 파워 컨트롤 명령을 실어 각 클러스터 구성원에게 전송하게 된다. 브로드캐스트 메시지는 또한 TDMA 스케줄링을 위해 클러스터 구성원 간 시간적 동기화를 맞추는 목적도 가지고 있다. 각 클러스터 구성원이 브로드캐스트 메시지의 파워 컨트롤 명령을 수신하면 수신한 메시지에 해당하는 RSSI를 계산하여 무선 송수신기의 송신 파워를 조절한다. 즉 클러스터 구성원의 파워 컨트롤은 Open Loop 방식으로 진행된다. 파워 컨트롤이 끝난 후 자신의 TDMA 스케줄 시간에 센싱 데이터를 클러스터 헤드 노드에게 전송한다.

TDMA에 의한 데이터 전송 단계가 끝나면 클러스터 헤드 노드는 브로드캐스트 메시지에 파워 컨트롤 해제 명령을 실어 전송한다. 즉 구성원들에게 클러스터 통신이 끝났으니 파워를 기본 값으로 조절하라고 명령하게 된다. 그리고 자신의 무선 송수신기 파워도 기본 값으로 조절한 후 LEACH의 방식에 따라 수집된 데이터를 집합

하여 가공을 거쳐 싱크 노드에게 최대 파워로 전송을 한다. 전송이 끝나면 다음 라운드를 시작하게 된다.

그림 2는 LEACH-PC의 파워 결정 알고리즘을 나타낸 것이다. 클러스터 셋업 단계와 클러스터 내부의 TDMA 통신 단계 사이에 클러스터 헤드 노드에 의한 적절한 파워 값 산출과 그 값을 클러스터에 적용하는 과정을 보여 준다.

```

for (int i=0; i<# cluster nodes; i++) {
    if (max_rssi < nodes[i].rssi) {
        max_rssi = nodes[i].rssi;
    }
}
calc_power = rssi_to_power(max_rssi);
for (int j=0; j<# power levels; j++) {
    if (calc_power <= power_level[j].power
        && min_diff <
            (power_level[j].power - calc_power)) {
        min_diff = power_level[j].power - calc_power;
        power_code = power_level[j].code;
    }
}
set_power(power_code);
send_broadcast(POWER_CONTROL);
    
```

그림 2. 클러스터 헤드 노드의 파워 결정 알고리즘

4. 실험 및 성능 평가

본 논문에서 제안한 LEACH-PC의 성능을 평가하기 위하여 NS-2 네트워크 시뮬레이터를 사용하여 실험을 수행하였다[8]. 그림 3과 같이 100m X 100m의 필드에 100개의 노드를 임의로 위치시키고, 싱크 노드의 위치는 원점(0,0)에 고정시켰다. 각 노드의 에너지는 동일하게 2J(Joule)로 초기화 하였다.

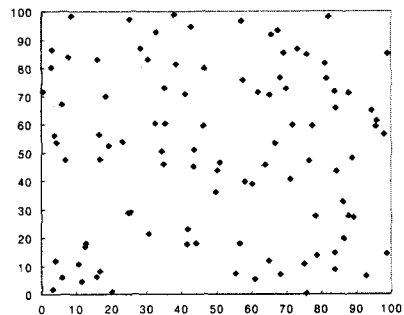


그림 3. 100개의 노드로 구성된 네트워크

그림 3의 환경에서 LEACH와 LEACH-PC를 각각 사용하여 실험을 한 후 각 프로토콜의 성능을 비교하였다. LEACH의 경우에는 고정된 전송파워를 사용하였고 LEACH-PC는 두 노드 간에 조절된 전송파워를 사용하

였다. 클러스터는 동일하게 전체 노드 수의 5%인 5개로 두었고 매 20라운드마다 클러스터 구성을 변경하였다.

그림 4는 LEACH와 LEACH-PC를 사용하였을 경우 매라운드마다 각 노드에서 소비한 에너지의 양을 합산하여 J단위로 그래프로 나타낸 것이다. 그래프의 결과를 통해 제안하는 LEACH-PC가 전체 네트워크의 에너지 소모가 적다는 것을 확인 할 수 있다.

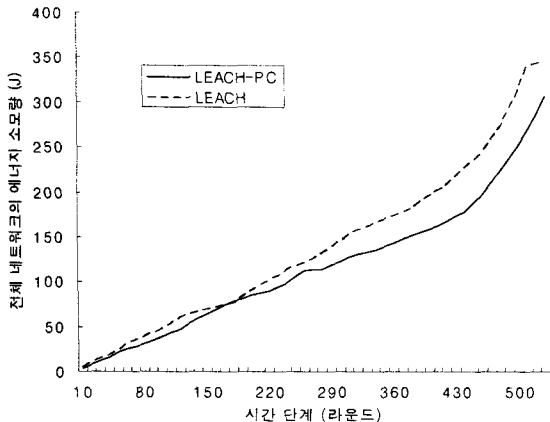


그림 4. 전체 네트워크에서 소모된 에너지 총량

그림 5는 LEACH와 LEACH-PC를 각각 사용하였을 경우 라운드가 경과함에 따라 에너지가 고갈되는 노드의 수를 보여준다. 그래프의 결과를 통해 LEACH의 경우 LEACH-PC보다 빠른 약 150라운드부터 최초로 고갈된 노드가 발견되기 시작하고 약 540라운드에서는 모든 노드의 에너지가 고갈된 것을 알 수 있다. 이에 반해 LEACH-PC의 경우 최초의 고갈 시기도 늦을 뿐 아니라 전체 네트워크의 수명도 LEACH보다 길다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 LEACH에 파워 컨트롤 기법을 적용한 LEACH-PC가 네트워크 수명을 연장 시킬 수 있는 에너지 효율적인 방식이라는 것을 확인 할 수 있다.

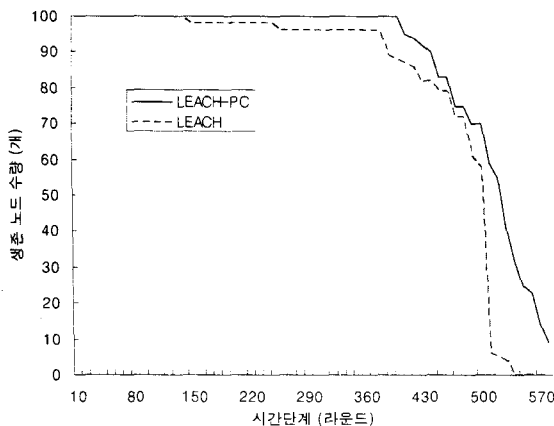


그림 5. 시간에 따른 노드의 수명

5. 결론 및 향후과제

제한된 배터리를 갖는 노드로 구성되는 무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율적인 많은 연구가 진행되고 있고 그 중 하나로 파워 컨트롤 기법을 들 수 있다. 파워 컨트롤 기법은 송신기의 전송 파워를 적절히 조절하는 방식을 통해 네트워크의 에너지 소모를 감소시킨다. 무선 센서 네트워크에서 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜인 LEACH에 파워 컨트롤 기법을 적용한 LEACH-PC는 기존의 LEACH 프로토콜에 비해 에너지 효율적인 특성을 보이고 네트워크 수명을 연장시킬 수 있음을 실험을 통해 나타내었다.

향후 무선 센서 네트워크의 다양한 기술과 파워컨트롤 간의 접목을 시도하여 파워 컨트롤의 장점을 극대화 할 수 있는 방법을 찾고자 한다. 또한 파워 컨트롤을 위해 본 논문에서 사용한 RSSI 값은 하드웨어에 의존적이기 때문에 다양한 플랫폼에 적용할 수 있는 측정 기준을 연구하고자 한다.

참고 문헌

- [1] 채동현, 한규호, 임경수, 안순신, "센서 네트워크의 개요 및 기술동향," 정보과학회 논문지, 2004. 12.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communication Magazine, Aug, 2002.
- [3] 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, Feb, 2002.
- [4] P. C. Nar and E. Cayirci, "PCSMAC: a power controlled sensor-MAC protocol for wireless sensor networks," Second European Workshop, Feb, 2005.
- [5] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Hawaii Conference on System Sciences, Jan, 2000.
- [6] D. Son, B. Krishnamachari and J. Heidemann, "Experimental study of the effects of Transmission Power Control and Blacklisting in Wireless Sensor Networks," IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Nov, 2004.
- [7] Q. Jiang and D. Manivannan, "Routing Protocols for Sensor Networks," IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Jan, 2004.
- [8] The network simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nanam/ns/>