

개방형 혼합 네트워크를 이용한 저전력 멀티-홉 네트워크 프로토콜

강정훈⁰, 유준재, 임호정, 박용국, 이민구, 고원식, 김동익
전자부품연구원

{budge, yoojj, hlim, ykpark, emingoo, kows, dikim}@keti.re.kr

Hybrid open networking stack for low-power multi-hop network protocol

Jeonghoon Kang⁰, Junejae Yoo, Hojung Lim, Yongkook Park, Mingoo Lee, Wonsik Ko, Dongik Kim
Korea Electronics Technology Institute

요 약

HONS(Hybrid Open Networking Stack) 는 다양한 무선 센서들을 하나의 네트워크로 서비스할 수 있는 시스템이다. IEEE 802.15.4 표준의 Open 패킷 구조를 정의하여, 다양한 센서를 저전력 멀티-홉 네트워크로 구성할 수 있다. HONS 네트워크는 라우터와 무선 센서로 구성된다. 라우터는 전원을 사용하여 멀티-홉 네트워크의 기본 백본을 형성하며, 무선 센서는 배터리로 저전력 동작을 하여, 라우터가 구성하는 멀티-홉 네트워크에 참여한다.

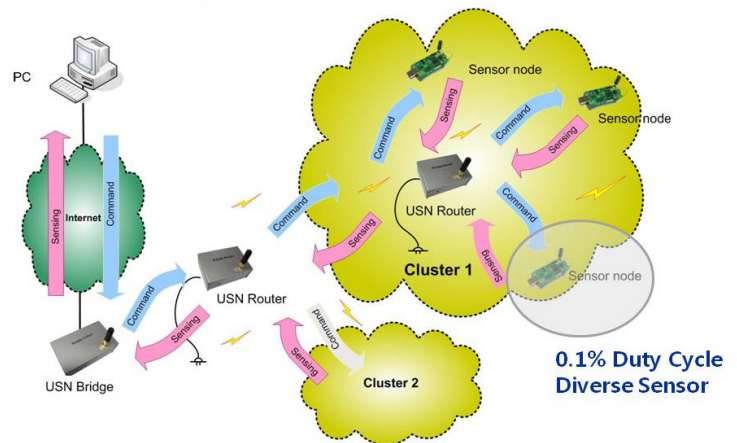
1. 서 론

무선센서의 멀티홉 네트워크 서비스를 위해서는 저전력의 네트워크 스택이 필수 요소이다 특히 야외환경에서 유선 전원을 사용할 수 없는 경우 저전력 성능이 시스템 전체 특성을 대표하는 값으로 인식 된다 무선센서 네트워크 적용 분야를 분석하면 전원을 사용할 수 있는 환경도 많다. 예를 들면, 공장자동화, 홈 네트워크, u-항구, u-유틸리티 등이다. HONS (Hybrid Open Networking Stack)는 이러한 다양한 환경에 적합하도록 저전력 기능이 강화된 2 단계 네트워크로 구성 되도록 설계하였다. HONS는 라우터와 저전력 무선 센서로 구성된다. 또한 라우터는 전원에 연결되어 멀티홉 메쉬 라우팅 기능을 제공한다 저전력 무선 센서는 저전력으로 동작하며 라우터가 형성하는 멀티홉 네트워크에 참여한다. 라우터는 안정적인 멀티홉 네트워크를 제공하며 무선 센서는 매우 짧은 코드로 다양한 센서를 저전력으로 네트워크에 연결할 수 있다 HONS는 라우터와 무선 센서를 TinyOS를 기반으로 구현하였다 다양한 온도, 습도, 조도, 가속도, 가전기기 전류 센서 인체감지, 도어센서를 하나의 네트워크로 지원하며 무선 센서의 추가가 매우 쉬운 장점이 있다. 본 고에서는 개방형 혼합 네트워크를 이용한 저전력 멀티홉 네트워크 프로토콜 기술에 대해 설명한다. 2장에서는 HONS 시스템 구성을 설명하고 3장에서는 개발된 기술, 4장에서는 실측된 성능에 대해 설명한다. 끝으로, 연구개발을 통하여 얻었던 결론을 맺는다.

2. 시스템 구성

2.1 개요

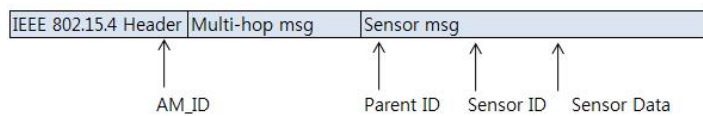
HONS 시스템은 애플리케이션을 위한 서버 서버와 멀티-홉 네트워크를 인터넷을 통해 연결하는 USN-bridge, USN router, wireless sensor node로 구성된다. 인터넷-브릿지는 Sink node의 역할을 하여 네트워크 형성 시작점이고 데이터 수집하여 인터넷을 통해 서버로 전송한다. 라우터는 멀티-홉 네트워크를 형성하고 있으며, 언제라도 무선 센서가 전송하는 패킷을 수신하면 USN-bridge로 전송한다. Wireless sensor는 주기적으로 센서 데이터를 전송하며 저전력 동작을 위해 전송에 필요한 Radio 동작 시간을 제외하고는 sleep 상태를 유지한다.



(그림 1) HONS 시스템

2.1 Open Networking Packet Interface

Wireless sensor와 router가 네트워크로 연결되기 위해서, 동일한 IEEE 802.15.4 표준 규격을 사용한다. Wireless sensor는 주변 USN router 중 하나를 parent 로 정하여 네트워크를 구성하고 멀티-홉 네트워크는 지원하지 않으며 single-hop 으로만 네트워크에 연결된다. 이런 특징 때문에 자신의 센서 데이터를 전송하는 순간에만 RF를 사용하여 duty-cycle 조절이 가능하다. 일반 알카라인 AA 배터리로 1분에 한번 전송하는 조건으로 약 3년의 동작시간을 제공할 수 있다. USN router와 wireless sensor 데이터 연동을 위해서 정해진 active message ID[1]와 데이터 필드를 정의하여 사용한다.



(그림 2) Open Networking Packet Interface

Wireless sensor가 네트워크에 연결되기 위해서 USN router와 동일한 RF 채널과 그룹 아이디를 사용한다. Wireless sensor는 네트워크에 연결되기 전에는 주기적으로 센서 데이터를 브로드캐스팅 한다. 네트워크에 연결되기 위해, wireless sensor는 USN router가 주기적으로 전송하는 멀티-홉 라우팅 메시지를 수신하여 parent 를 결정한다. Parent 가 결정되면 duty-cycling을 시작하여 저전력으로 동작한다.

3. 저전력 멀티-홉 네트워크 프로토콜

3.1 분산 Routing 기술

Mesh Networking의 핵심적인 문제는 목적지까지의 경로, 즉 route를 계산하는 것이다. 본 연구에서는 기본 취합율을 우선적으로 만족하는 범위 하에서 수명을 최대화하는 전략을 선택하였기 때문에 route의 결정은 전송에 드는 전력을 최소화하는 것을 기준으로 하면 된다. 언뜻 생각하기에 이는 route의 결정에 취합율에 대한 고려를 전혀 넣지 않는 것으로 보일 수 있다. 이후 설명에 나오지만, 결국 전송 전력을 최소화하는 과정에서 재전송이 많이 발생하는 취약 구간을 회피하게 되기 때문에 간접적으로 반영이 된다. 취합율과 전력소모 간의 trade-off 관계 때문에 나오는 결과이다.

본 연구에서뿐만 아니라, 모든 학계 및 산업계에서 USN Routing에 공히 쓰는 알고리즘이 Bellman-Ford 알고리즘이다[2]. 각 센서를 node로 보고, 서로 송수신이 가능한 센서 쌍들을 edge로 간주하면, 전체 USN을 그래프로 표현할 수 있다. 각 edge의 weight를 전송에 드는 전력에 비례하게끔 설정하면 Bellman-Ford 알고리즘을 통해서 모든 센서에서 GW까지 최소한의 전력을 사용하여 패킷을 전달하는 경로를 찾게 된다. 본 연구에서 각 edge의 weight는, 해당 송신자가 취합율을 만족하는 설정하에서 하나의 패킷을 수신자에게 전달하는데 드는 전력으로 설정하였다. 이는 (송신출력) × (평균전송횟수)와 같다.

Bellman-Ford 알고리즘은 분산화하기 쉽다. 각 센서는 자신으로부터 GW까지의 distance를 각자 저장한다. 모든 노드는 처음에 distance를 ∞로 초기화한다. 또한 GW까지의 최소 경로의 첫 단계 node인 predecessor를 각자 저장하며, NULL 값으로 초기화한다. Bellman-Ford 알고리즘에서의 relaxation은 각 센서에서 beacon이라는 패킷을 broadcast하면서 이루어진다. Beacon에는 항상 송신자의 distance가 데이터로서 실려서 보내어진다. 알고리즘은 GW가 beacon을 송신함으로써 시작된다. GW의 distance는 0이기 때문에, 이 beacon에는 distance=0이라는 정보가 실려서 방송된다. 각 센서에서 beacon을 수신할 시에는 혹시 해당 beacon의 송신자를 predecessor로 삼는 것이, 현재 자신의 predecessor보다 나은 선택인지를 검사한다. 현재 자신의 predecessor 쪽으로 가는 비용이 현재 distance이기 때문에, 아래 부등식이 참이면 beacon 송신자로 predecessor를 바꾼다.

$$\text{distance} > (\text{beacon에 기록된 distance}) + (\text{beacon 송신자까지의 전송비용})$$

각 센서는 위의 절차에 따라 자신의 distance 값이 갱신되면 자신도 beacon을 broadcast한다. 따라서, 전체적인 양상은, GW 주변 센서들의 beacon 전송을 시작으로 해서, 점차 바깥쪽으로 각 센서의 distance 값의 변경 및 beacon 전송이 연쇄반응이 일어나듯이 퍼져나가는 것이다. 각 센서는 언젠가는 자신으로부터 GW까지 가는 최소 경로의 역순에 따라 내려온 beacon을 받게 되므로, 이때 최소 경로로 향하는 predecessor를 찾게 된다. 그러므로, 결국에는 모든 센서들이 최소경로를 찾아 distance 값이 최소화되어 beacon 전송을 안 하게 되고 알고리즘은 종료된다.

3.2 동기화 기반 저전력 기술

대부분의 소형 전자 기기들은 최소한도의 전력만을 소모하는 수면 mode를 제공한다. 무선 센서 또한 1년 이상의 전지 수명을 가지려면 수면mode를 사용해야만 한다. 본 연구에서 사용한 무선 센서는 비수면mode에서 약 3~4일의 수명을 가지므로 1년 이상의 수명을 가지려면 전체 시간의 99%를 수면하고 1% 동안만 켜있어야 3~4일의 약 100배, 즉 약 1년의 수명을 가질 수 있다. 문제는 수면 모드에서는 무선 신호의 송수신이 불가능하다는 것이다. 해결 방법은 약속된 시간에 센서들이 동시에 일어나서 교신을 하고 다시 수면을 취하는 것이다. 본 연구에서는 1차적으로 간단한 flooding 기반의 프로토콜[3]에 clock 및 시차 정보를 실어서 센서들 전체를 GW의 clock에 동기화시키는 전체 동기화 방식을 사용하였다. 이 방식의 단점은 센서들의 개수가 증가함에 따라 전체를 동기화하는 전력 비용이 기하급수적으로 증가한다는 것이다. 따라서, 2차적으로는 서로 교신을 하는 센서들만 서로의 clock을 기억하는 개별 동기화 방식을 사용하였다. 이로 인한 성능 개선에 대해서는 4절에 설명되어 있다.

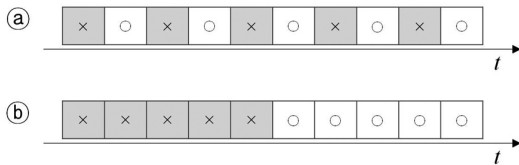
4. 성능 평가

4.1 데이터 취합율

실제 사무실 1개층에 100개의 센서를 시범 운영하여 전체 동기화 방식을 사용하고도 취합율 96.02%을 달성하였다. 자세한 실험 환경에 대해서는 5절에 설명되어 있다.

취합율과 관련하여 흔히 간과되는 성능 지표가 누락된 패킷의 시간상 분포이다. 예를 들어, 똑같이 10개 패킷 중 5개만 들어왔다 하더라도, 누락이 간헐적으로 일어나는 경우(그림 3의 ㉑)와, 연속적으로 일어나는 경우(그림 3의 ㉒), 센싱 정보 없이 대기해야 하는 시간의 길이가 다르다.

따라서, 실측된 데이터에서 패킷이 몇 회까지 연속으로 누락되는지 통계를 낸 결과, <표 1>을 얻었다. 연속 누락 횟수가 길어질수록 발생 빈도가 적어진다는 것을 볼 수 있다. 특히 5회 이상 연속으로 데이터가 안 들어오는 경우가 없어, 마지막 데이터가 들어온 시각으로부터 적어도 30분 이내에는 데이터가 들어온다는 것을 볼 수 있다



(그림 3) 누락 패킷의 분포의 중요성 예시 (○는 성공적으로 취합된 패킷을 나타내고, ×는 실패를 나타낸다)

<표 1> 전체 동기화 방식 사용 시 연속 누락 횟수 별 빈도

연속된 에러의 횟수	발생 빈도(%)
1	2.10
2	1.09
3	0.52
4	0.27
합계	3.98

개별 동기화 방식을 적용하였을 때에는 동일한 환경에서 99.8%의 취합율을 달성하였다. 특히, 2회 이상 연속으로 패킷이 누락되는 경우가 전혀 없었다. 이는 개별 동기화의 특성상 센서들이 동시에 송신을 하는 경우가 현저하게 줄어들어서 얻은 결과이다.

4.2 전지 수명

제품의 전지 수명은 몇 년을 사용할 수 있는 가로 평가되나, 사용되는 전지가 무엇인지에 따라 크게 변하기 때문에, 제품 자체의 성능을 비교하기에는 객관적이지 못한 지표가 될 수 있다. 예를 들어, 시중에 나와 있는 기존의 실내용 무선 센서들은 대부분 고가의 고용량 리튬 전지를 사용한다.

본 연구에서는 객관적인 저전력 성능을 가늠하기 위하여, 평균 전류를 성능 지표로 삼았다. 평균 전류

(Average Current)란, 순간 전류가 일정하지 않은 회로의 순간 전류 그래프를 적분하여 측정 시간으로 나눈 수치를 말한다. 이는 전통적으로 Oscilloscope을 사용하여 많이 계산되어 왔으며, 최근에는 자동으로 계산해주는 제품들이 나와 있다[4].

본 연구에서 실측 실험을 통하여 얻은 전력 소모 성능은 <표 2>와 같다. 각 센서는 위치에 따라 중계해야 하는 센서 데이터의 양이 다르기 때문에 평균 전류 또한 다르다. 따라서 <표 2>에는 전체 센서들의 평균 전류를 다시 평균 낸 통계치와 가장 전기를 많이 소모하는 센서의 평균 전류를 함께 표기하였다.

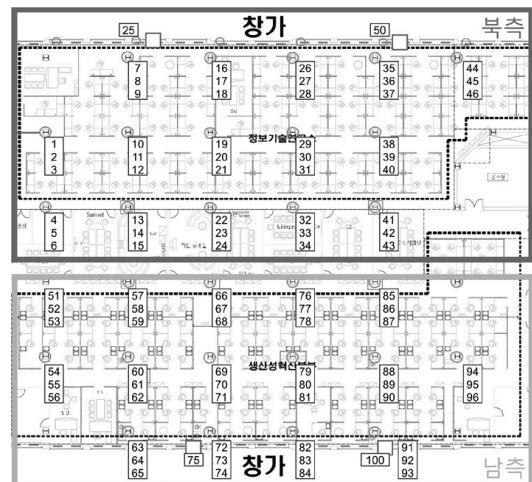
<표 2> 각 방식 별 평균 전류량

동기화 방식	통계치	평균전류 (μA)
전체	최대	420
	평균	314
개별	최대	370
	평균	251

전체 동기화 방식의 센서들을 실제 사무실에서 장기 운영하였을 때, 10개월 동안 정상 운영되다가 일부 센서에서 오동작을 하기 시작하였다. 위의 모든 결과치들은 모든 센서에 일반 알카라인 AA 전지 2개를 넣고, 5분 간격으로 각 센서에서 온·습도 데이터가 발생할 때의 실측치이다.

5. 건물 내 시범 운영

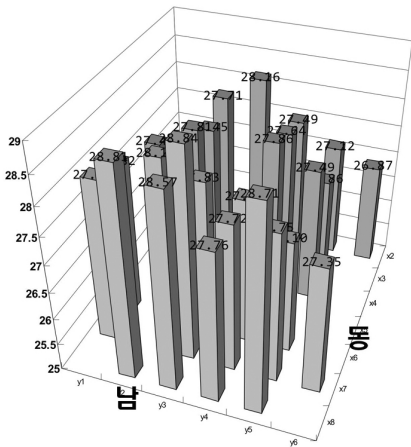
건물 에너지를 가장 최소화하는 방법은 냉난방을 아예 하지 않는 것이다. 하지만, 사람이 거주하는 건물에서 이것은 비현실적이다. 따라서, 에너지 절감이라는 지표도 실내 쾌적도라는 지표와 절충이 필요하다.



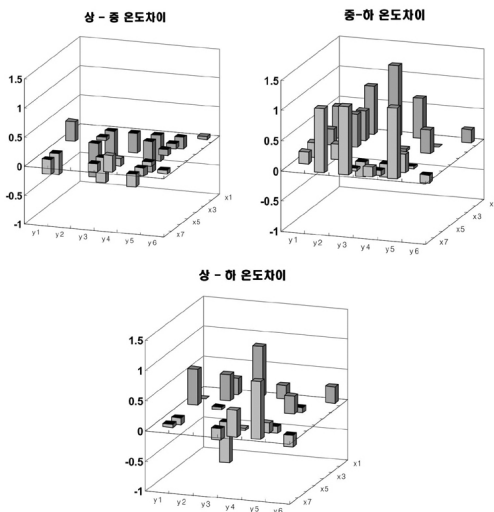
(그림 4) ASHRAE 표준에 준한 수평 배치 (창측으로부터 세가지 거리에 센서를 설치)

세계적인 권위를 가지고 있는 미국의 공조 시스템 협회인 ASHRAE에서는 재실자의 쾌적도에 대한 표준을 제정하고 있다[5]. 본 연구에서는 삼성SDS 정보기술연구소 사무실에 ASHRAE 표준에 준하여, 창가에서 먼 곳, 가까운 곳, 중간 거리에 있는 위치에 센서들을 설치하였다.

(그림 4). 그리고, 이 각각의 수평 지점에 상중/하 세가지 높이로 센서들을 설치하였다



(그림 5) 1.7 m 높이에 설치했던 센서들의 온도값



(그림 6) 상/중/하 온도차

시험 운영 결과, 예상했던 것보다 다양한 온도 분포를 볼 수 있었다. 평면도 상으로 보았을 때 남향이 더 따뜻했을 뿐만이 아니라, 여러 환경적 요인으로 각 위치에 있는 온도 값들이 섭씨 2도 이상 차이가 났다(그림 5). 또한, 높이에 따라서도 온도차가 심하게 나는 것을 볼 수 있었다(그림 6). 특이한 점은 상부 온도가 중간 높이 보다 낮았다는 것인데, 이는 측정 기간이 여름이고 사무실이 천장 통풍구를 통하여 냉방을 함에 따른 결과인 것으로 분석된다.

5. 결론

다양한 센서를 통합하여 네트워크를 구성하고 저전력으로 각 센서의 통신 수명을 연장하는 것은 유비쿼터스 지능형 시스템의 필수 기술이다 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 기반의 저전력 프로토콜과 네트워크 구성 방법

에 대해 제안하였으며, 실제 건물환경에서의 대규모 네트워크 구성 동작 및 전송 신뢰성에 대해 평가하였다 현재 무선 통신 하드웨어의 기술은 2년 이상의 멀티-홉 저전력 수명을 보장하기 위해 하이브리드 방식으로 네트워크를 구성해야 하며 이를 통해 다양한 센서의 듀티 사이클링 기법이 단순해져 최적화된 저전력 네트워크 성능으로 동작할 수 있다. 단순한 센서 기능에 따라 많은 종류의 센서를 통신 모듈에 통합시킬 수 있으며 다양한 센서 통합을 지원하는 확장성은 기존의 무선랜이나 블루투스가 지원하지 못 했던 기능이다 향후 홈네트워크나 지능형 빌딩 시스템에서 확장성 있는 네트워크 기술로 사용될 수 있기 때문에 다양한 디바이스 어플리케이션에 적용될 수 있을 것으로 기대된다

참고문헌

- [1] Active Message Communication for Tiny Network Sensors, Jason Hill, Philip Bounadonna, David Culler
- [2] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, and C. Stein, Introduction to Algorithms, Second Edition, The MIT Press, 2001; Section 24.1: The Bellman-Ford algorithm, pp.588-592.
- [3] "Flooding algorithm - Wikipedia, the free encyclopedia" ; http://en.wikipedia.org/wiki/Flooding_algorithm.
- [4] "Agilent/66311B " ; <http://www.home.agilent.com/>.
- [5] ASHRAE, "Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" ;<http://eweb.ashrae.org>.