

Mitigating Hidden Nodes Collision and Performance Enhancement in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks

Kwang-Hoon Ahn[†] · Taejoon Kim^{††}

ABSTRACT

IEEE 802.15.4 is the well-established standard enabling wireless connectivities among wireless sensor nodes. However, the wireless sensor networks based on IEEE 802.15.4 are inherently vulnerable to hidden nodes collision because the wireless sensor nodes have very limited communication range and battery life time. In this paper, we propose the advanced method of mitigating hidden nodes collision in IEEE 802.15.4 base wireless sensor networks by clustering sensor nodes according to channel quality information. Moreover, we deal with the problem of resource allocation for each cluster.

Keywords : Wireless Sensor Network, Hidden Nodes Collision, IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 기반의 무선 센서네트워크에서 숨은노드 충돌 방지와 성능향상 기법

안 광 훈[†] · 김 태 준^{††}

요 약

IEEE 802.15.4는 무선 센서노드들 사이의 연결을 가능하게 하는 대표적인 표준이다. 그러나 이 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 무선 센서네트워크는 기본적으로 숨은노드 충돌에 매우 취약하다는 약점을 갖고 있는데 이는 무선 센서네트워크 자체가 제한된 통신 반경과 짧은 배터리 수명을 갖고 있기 때문이다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 기반의 무선 센서네트워크에서 노드들의 클러스터링을 통한 숨은노드 충돌 회피 및 성능향상 기법을 제안한다. 이 방법에서 사용되는 클러스터링은 각각의 무선 센서노드들이 갖고 있는 채널 품질 정보를 바탕으로 수행된다. 그리고 클러스터에 어느 정도의 무선자원을 할당해야 하는 문제도 다룬다.

키워드 : 무선 센서네트워크, 숨은노드 충돌, IEEE 802.15.4

1. 서 론

IEEE 802.15.4[1]는 가장 많이 사용되고 있는 무선 센서네트워크 기술표준이다. IEEE 802.15.4의 MAC(Medium Access Control) 계층은 일반적으로 경쟁 기반의 무선 자원 접근 방식인 CSMA-CA(Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance)를 사용하고 있다. 이 기법에 생길 수 있는 대표적인 문제가 숨은노드 충돌 문제이다. 두 개의 센서노드가 중앙의 팬코디네이터(personal area network coordinator)에 데이터를 전송하고자 하는 경우 팬코디네이터와 센서노드가 서로의 캐리어 신호를 감지할 수 있는 위치에 있는 반면,

각각의 센서노드들은 서로 캐리어 신호를 감지할 수 없는 위치에 있는 경우 두 개의 센서노드들 사이에 패킷의 충돌이 발생할 수 있다. 이를 숨은노드 충돌이라 하며 이는 무선 센서네트워크의 성능을 심각하게 저해하는 요인이 된다. 무선 센서네트워크에서 숨은노드 충돌을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되었다. 캐리어 신호 감지의 민감도를 조절하는 기법[2]에서는 캐리어 신호를 감지하는 민감도를 상황에 맞게 조절하여 무선 센서노드의 통신 반경을 확대하는 방법을 사용하여 숨은노드 충돌을 줄이고 있다. 노드 그룹핑 방법[3]에서는 센서노드들을 몇 개의 그룹으로 나누어서 관리하고 있으며 같은 그룹에 속한 센서노드들은 서로 숨은노드 관계에 있지 않도록 노드들의 그룹을 형성하고 다른 그룹은 매체접근 시간을 분리하여 숨은노드 충돌을 제거하고 있다. 논문[4]에서는 전체 센서노드 중에서 숨은노드 충돌을 주로 일으키는 센서노드를 골라내고 이들 노드들은 시간상 따로 정해진 시간에 전송하도록 하는 방식을 제안하고 있다. 논문[6]에서는 팬코디네이터 사이의 협력을 통하여 숨은노드를

* 이 논문은 2013학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 본 연구는 2014년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행하였음(NO. 20144030200450).

† 비 회 원 : 충북대학교 정보통신공학과 석사과정

†† 정 회 원 : 충북대학교 정보통신공학부 조교수

Manuscript Received: February 25, 2015

Accepted: May 7, 2015

* Corresponding Author: Taejoon Kim(ktjcc@chungbuk.ac.kr)

찾아내는 기법을 제안하고 있고 논문[7]에서는 노드 그룹핑 방식의 성능을 분석하고 있다. 본 논문에서는 효과적으로 숨은노드 충돌을 줄일 수 있는 센서노드 클러스터링 기법을 제안한다. 제안된 방식에서는 센서노드들을 채널 상태 정보에 따라서 정렬하고 이를 바탕으로 효과적으로 센서노드들을 클러스터링하고 있다.

2. IEEE 802.15.4 표준

IEEE 802.15.4의 센서 네트워크는 비콘 신호를 사용하는 모드와 비콘 신호를 사용하지 않는 모드를 모두 지원한다. 그리고 센서네트워크의 최상위에서 네트워크를 통제하는 노드를 팬(PAN: Personal Area Network)코디네이터라 한다. 본 논문에서는 비콘 사용 모드를 대상으로 한다. 이때 팬코디네이터는 주기적으로 비콘 프레임을 방송한다. IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임은 두 비콘 프레임 사이에 위치하고 있으며 이는 다시 16개의 동일한 크기를 갖는 슬롯으로 나누어진다. 비콘 프레임은 슈퍼프레임의 16개 슬롯 중에서 첫 번째 슬롯에서 전송된다. 슈퍼프레임은 다시 경쟁 접속 구간(CAP: Contention Access Period)과 비경쟁 접속 구간(CFP: Contention Free Period)로 나뉘게 된다. CAP는 비콘 프레임 직후부터 존재하는 구간이다. 이런 슈퍼프레임의 구조는 Fig. 1에 표시되어있다.

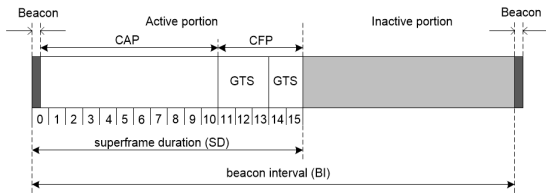


Fig. 1. Superframe Structure for IEEE 802.15.4

경쟁 구간에서 통신하고자 하는 모든 센서노드들은 슬롯 기반의 CSMA-CA 방식을 사용해야 한다.

3. 센서노드 클러스터링 알고리즘

센서노드 클러스터링 알고리즘은 원래의 CAP를 몇 개의 부경쟁구간들로 (sub-CAPs)로 분할한다. 각각의 센서노드들은 자신에게 할당된 부경쟁구간에서만 CSMA-CA 방식으로 전송할 수 있다. 제안된 알고리즘의 첫 번째 단계에서는 어느 시점에서 클러스터링 알고리즘을 시작해야 하는가를 결정하게 된다. 그러므로 숨은노드에 의한 패킷 충돌이 얼마나 자주 발생하는가를 측정해야 한다. 그러나 CSMA-CA 방식에서는 숨은노드 관계에 있지 않은 경우에도 노드의 수가 증가하면 패킷의 충돌이 증가하게 된다. 이는 CSMA-CA 운용에서 두 개 이상의 센서노드들이 동일한 backoff 값을 선택한 경우에 발생하게 된다. 이 경우 센서노드들이 동일한 슬롯에서 전송을 시작하면서 패킷 충돌이 발생하므로 팬코디네이터는 패킷을 전혀 디코딩하지 못한다. 그러나

숨은노드 충돌의 경우 두 센서노드의 전송 시작 시점이 서로 다를 수 있으므로 팬코디네이터는 먼저 전송된 패킷의 일부분을 디코딩할 가능성이 높다[5]. 팬코디네이터가 앞의 일부분만 디코딩이 가능한 패킷을 수신한 경우에 숨은노드 충돌이 발생하였다고 추정한다. 정상적인 경쟁에 의한 패킷 충돌의 횟수와 숨은노드 충돌로 추정되는 패킷 충돌의 횟수의 비율을 현재 숨은노드 충돌이 얼마나 심각한가를 나타내는 지표로 사용할 수 있다. 이는 최근 n개의 수신 패킷을 이용하여 다음의 $Z(t)$ 를 나타낼 수 있다.

$$Z(t) = \frac{\sum_{k=t-n}^t C_h(k)}{\sum_{k=t-n}^t (C_h(k) + C_c(k))} \tag{1}$$

여기서 $C_h(k)$ 와 $C_c(k)$ 는 각각 시간 t에서 숨은노드 추정 충돌과 경쟁 충돌이 발생한 경우 1의 값을 갖고 그렇지 않은 경우 0의 값을 갖는 인디케이터 함수이다. $Z(t)$ 를 이용하여 현재 숨은노드 충돌이 얼마나 심각한지 판단하며 $Z(t) > \epsilon$ 으로 미리 정해진 문턱값 ϵ 보다 $Z(t)$ 가 클 경우 센서노드 클러스터링 알고리즘을 시작한다. $Z(t)$ 와 함께 팬코디네이터는 자기에게 등록된 센서노드들의 채널 품질 정보(LQI: Link Quality Indicator)를 측정하고 최근 패킷들에 대한 평균값을 다음과 같이 관리한다.

$$W_i(k) = (1 - \frac{1}{T})W_i(k-1) + \frac{1}{T}L_i(k), i = 1, \dots, M \tag{2}$$

$W_i(k)$ 는 i번째 센서노드의 시간 k에서 LQI 평균값이고 T는 평균을 위한 윈도우 크기이며 M은 전체 센서노드의 수이다. 알고리즘이 시작되면 팬코디네이터는 $W_i(k)$ 를 내림차순으로 정렬하고 클러스터링 초기화 메시지를 비콘 프레임에 싣고 전체 센서노드들에게 알린다. 비콘 프레임의 MAC header의 프레임 제어 필드(frame control field)는 2byte의 길이를 갖고 프레임 타입, 주소필드 및 다른 플래그 정보를 갖고 있으며 7~9bit 사이의 reserved field를 갖고 있다. 이 필드를 이용하여 새로운 클러스터링 초기화 메시지를 보내게 된다. 추가적으로 비콘 프레임의 페이로드에는 내림차순으로 정렬된 센서노드들의 주소를 싣는다. IEEE 802.15.4의 경우 일반적인 MAC address와는 달리 64-bit 체계를 사용하고 있고 경우에 따라서는 짧은 16-bit 체계를 사용하고 있다. 본 논문에서는 비콘에 센서노드의 주소를 싣는 부담을 줄이기 위하여 IEEE 802.15.4에서 제안하는 주소 체계와 별도로 팬코디네이터가 자신에게 등록된 센서노드를 관리하는 8-bit 주소 관리 체계를 추가적으로 제안한다. 센서노드가 팬코디네이터에 등록되는 경우 센서노드에 8-bit 관리주소를 부여한다. 이후의 클러스터링과 응답에는 이 8-bit 관리주소가 사용된다. 비콘 프레임의 클러스터링 초기화 메시지를 수신한 센서노드들은 수신기를 RX_ON 상태로 전환하고 promiscuous 모드로 동작하면서 다른 센서노드들이 전송하는 패킷을 정상 수신한 경우 전송한 센서노드의 주소를 순서대로 기록한다. 그리고 비콘 프레임에서 포

함된 센서노드 순서대로 팬코디네이터가 보낸 클러스터링 초기화 메시지에 대한 응답 프레임이 보내게 된다. 이때 응답 프레임의 페이로드는 각각의 센서노드들이 지금까지 수신한 다른 센서노드들의 주소를 포함하게 된다. Fig. 2는 0번의 팬코디네이터를 중심으로 7개의 센서노드가 배치되어 있는 한 예이다. 여기서 가로와 세로 점선 사이의 간격은 모두 5m이며 캐리어 검출 가능 거리는 18m라고 한다.

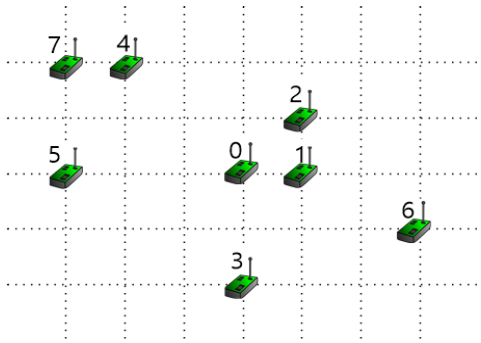


Fig. 2. Topology Example with 8 Sensor Nodes

Fig. 2의 예에서 센서노드들의 $W_i(k)$ 를 내림차순으로 정렬하면 각각의 센서노드들에 부여된 번호와 동일하다고 한다. 팬코디네이터가 클러스터링 초기화 메시지를 보낸 후에 각각의 센서노드들은 1번부터 7번 순서로 응답 프레임을 보내며 이는 Fig. 3에 나타나있다.

Beacon	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7		1	1, 2	1, 2	4	1, 2, 3	4, 5

Fig. 3. Responding Frames of Sensor Nodes

이 Fig. 3에서 노드 1은 첫 번째 응답 센서노드이므로 자신이 수신 가능한 센서노드는 비어있다. 노드 2는 노드 1의 응답 프레임 전송을 수신하였으므로 수신 가능한 센서노드 리스트에 노드 1을 표시하여 응답 프레임을 보낸다. 노드 3도 같은 방식으로 응답 프레임을 보낸다. 같은 과정으로 노드 7의 응답 프레임 전송까지 이어진다. 센서노드들이 응답 프레임을 보낼 때마다 팬코디네이터는 동적으로 응답을 보낸 센서노드가 포함될 클러스터를 결정한다. 응답 프레임이 보내는 순서가 채널 품질 정보에 따라서 정렬되어있으므로 채널 품질 정보가 좋은 센서노드를 우선하여 클러스터링하게 된다. 이는 채널 품질 정보가 나쁜 센서노드일수록 팬코디네이터에서 멀리 떨어져 있는 경우가 많고 다른 센서노드들과 숨은노드 관계에 있을 확률이 높기 때문이다. 그러므로 채널 품질 정보가 좋은 센서노드부터 클러스터를 구성하며 한 클러스터에는 숨은노드 관계에 있지 않은 센서노드들을 가능한 많이 수용하는 방식으로 클러스터들을 구성하게 된다. 팬코디네이터는 새로 받은 응답 프레임의 수신 가능한 센서노드 리스트가 특정 클러스터의 모든 멤버 노드를 포함

하고 있으면 응답 프레임을 보낸 센서노드를 해당 클러스터의 새로운 멤버로 추가한다. 만약 이 조건을 만족하는 클러스터를 찾을 수 없는 경우에 새로운 클러스터를 생성하고 해당 센서노드가 생성된 클러스터의 첫 번째 멤버가 된다.

Table 1. Clustering Sensor Nodes

Res.	List	Cluster 1	Cluster 2
1	-	Created: 1	-
2	1	1, 2	-
3	1, 2	1, 2, 3	-
4	1, 2	1, 2, 3	Created: 4
5	4	1, 2, 3	4, 5
6	1, 2, 3	1, 2, 3, 6	4, 5
7	4, 5	1, 2, 3, 6	4, 5, 7

Table 1에서는 응답 프레임 정보에 따라서 클러스터를 생성하는 과정을 보여주고 있다. 클러스터 1에는 1, 2, 3, 6번 센서노드들이 포함되고 클러스터 2에는 4, 5, 7번 센서노드들이 포함된다. 팬코디네이터는 이미 정해진 수 이내로 클러스터를 생성해야 한다. 만약 숨은노드 관계에 있지 않은 클러스터를 찾을 수 없고 클러스터도 더 생성하지 못하는 경우에는 마지막으로 생성된 클러스터에 멤버를 추가하여 채널 상태가 상대적으로 양호한 센서노드들의 통신 열화를 막는다. 그리고 센서노드의 고장으로 정상적인 클러스터링이 불가능한 노드들도 가장 마지막으로 생성된 클러스터에 할당한다. 각각의 클러스터에 할당할 자원을 결정하기 위하여 팬코디네이터는 각각의 센서노드들이 전송하는 평균 트래픽을 계산한다. 그리고 클러스터에 포함된 센서노드들의 평균 트래픽을 합하고 이에 비례하여 각각의 클러스터에 자원을 할당한다. 클러스터링이 종료되면 팬코디네이터는 각각의 클러스터에 속한 센서노드의 트래픽 부하에 따라서 sub-CAP로 분할하고 이를 센서노드들에 전달한다.

4. 센서노드 클러스터링 시뮬레이션

제안된 알고리즘에 대하여 ns-2[8] 네트워크 시뮬레이터를 이용하여 검증하였다. 우선, 중앙의 0번 노드인 팬코디네이터를 중심으로 주변에 20개의 센서노드들을 임의로 배치하였다. 센서노드들의 분포는 Fig. 4에 나타나있고 이 그림에서 점선격자의 간격은 5m이고 센서노드들의 캐리어 검출 가능 거리는 약 24m이다. 채널환경은 통신 거리에만 영향을 받게 하였다. 각각의 센서노드에서 팬코디네이터로 전송되는 트래픽 부하를 1kbps에서 14kbps까지 증가시키고 전송 페이로드(payload) 크기를 40, 50, 60bytes로 달리하여 클러스터링을 수행하지 않은 경우와 수행한 경우의 전송률을 비교하였다. 팬코디네이터는 센서노드들의 채널 품질 정보에 따라 1, 2, 9, 12, 3, 8, 14, 4, 11, 13, 20, 5, 18, 6, 15, 16, 19, 7, 10, 17 순서를 비콘 프레임에 표시하여 전송한다. 주변의 센서노드들이 자신의 순서에 따라서 응답 프레임을 보내고 응답 프레임 정보를 바탕으로 팬코디네이터가 센서노드들을 클러스터링하면 Fig. 4와 같이 4개의 클러스터가 생성된다.

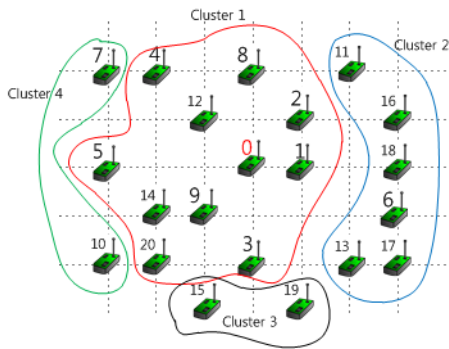


Fig. 4. Random Distribution of Sensor Nodes

클러스터링 원칙에 따라 중심 클러스터가 생기고 그 주변을 작은 클러스터가 둘러싸는 형태가 된다. Fig. 4의 클러스터 3 또는 클러스터 4의 경우 멤버가 2개에 불과하고 외곽에 위치하고 있으므로 작은 sub-CAP를 할당하여 센서네트워크 전체의 성능을 높일 수 있다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 전체 16개의 CAP 슬롯에서 0-7, 8-11, 12-13, 14-15 구간의 슬롯을 각각 클러스터 1, 2, 3, 4에 할당하였다.

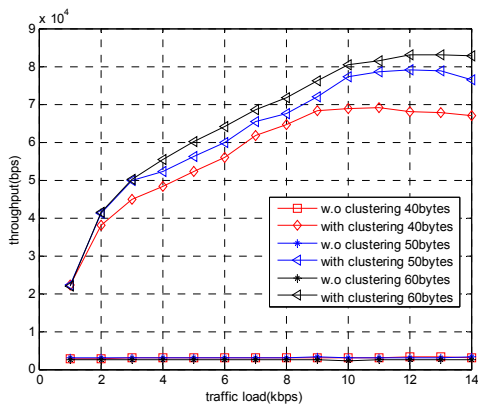


Fig. 5. Throughput vs Traffic Load

위의 Fig. 5에서는 클러스터링 유/무와 패킷 사이즈별로 센서노드의 트래픽 부하를 증가시키고 전체 전송률을 측정하였다. 클러스터링을 수행하지 않는 경우 전체 전송률이 2kbps에서 변화가 거의 없으며 정상적인 통신이 거의 불가능하였다. 클러스터링을 수행한 경우 82~70kbps에서 포화상태에 이르렀다. 클러스터링을 통하여 숨은노드 충돌이 매우 심각하게 발생하는 환경에서도 정상적인 통신이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 무선 센서네트워크에서 숨은노드 충돌이 심각하게 발생하는 경우에도 이를 극복할 수 있는 센서노드 클러스터링 기법을 제안하였다. 효율적인 클러스터링을 구현하기 위하여 짧은 주소 체계를 사용하고 성능이 떨어지는

센서노드들은 차별적으로 클러스터링 및 자원할당을 수행하여 무선 센서네트워크의 성능을 극대화하고 있다.

References

- [1] IEEE Std. 802.15.4-2011, *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE, Piscataway, N.J., 2011.
- [2] I. Ho, S. Liew, "Impact of power control on performance of IEEE 802.11 wireless networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.6, No.11, pp.1245-1258, Nov., 2007.
- [3] A. Koubaa, R. Severino, M. Alves, *et al.*, "Improving quality-of-service in wireless sensor networks by mitigating hidden-node collisions," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, Vol.5, No.3, pp.299-313, Aug., 2009.
- [4] H. W. Tseng, S. C. Yang, P. C. Yeh, *et al.*, "A cross-layer scheme for solving hidden device problem in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, Vol.11, No.2, pp.493-504, Feb., 2011.
- [5] L. J. Hwang, S. T. Sheu, Y. Y. Shih, *et al.*, "Grouping strategy for solving hidden-node problem in IEEE 802.15.4 LR-WPAN," *Proc. IEEE WICON*, pp.26, 2005.
- [6] K. Nishide, H. Kubo, R. Shinkuma, and T. Takahashi, "Detecting hidden and exposed terminal problems in densely deployed wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.11, No.11, pp.3841-3849, Nov., 2012.
- [7] J.-Y. Um, J.-S. Ahn, and K.-W. Lee, "Evaluation of the effects of a grouping Algorithm on IEEE 802.15.4 networks with hidden nodes," *Journal of Commun. and Networks*, Vol.16, No. 1, pp.81-91, Feb., 2014.
- [8] ns-2: The network simulator [Internet], <http://www.isi.edu/nsnam>.



안 광 훈

e-mail : wdwf990@chungbuk.ac.kr
 2015년 충북대학교 정보통신공학부(학사)
 2015년~현 재 충북대학교 정보통신공학과 석사과정
 관심분야: 센서 네트워크, 이동형 릴레이 시스템



김 태 준

e-mail : ktjcc@chungbuk.ac.kr
 2003년 연세대학교 전자공학과(학사)
 2011년 한국과학기술원 전기전자공학과 (석·박사통합)
 2003년~2005년 LG전자 단말연구소
 2011년~2013년 한국전자통신연구원
 2013년~현 재 충북대학교 정보통신공학부 조교수

관심분야: 센서 네트워크, 이동형 릴레이 시스템