

WiFi 트래픽 간섭을 피하기 위한 IEEE 802.15.4 노드의 채널탐색방법

Channel Searching Method of IEEE 802.15.4 Nodes for Avoiding WiFi Traffic Interference

송 명 렬^{1*}

Myong Lyol Song

요 약

이 논문에서는 IEEE 802.15.4 노드들이 WiFi 트래픽의 간섭을 피해 새로운 채널에서 동작하기 위해 다수의 IEEE 802.15.4 채널들에 대한 병렬적인 백오프지연과정과 WiFi 트래픽의 주파수 스펙트럼을 고려한 채널탐색방법에 연구되었다. WiFi 트래픽에 의해 점유되는 채널들을 탐색하기 위해, 인접한 채널들에 대한 전력을 동시에 측정하는 방법, 기준보다 큰 채널전력의 지속시간을 확인하는 방법, RSSI 샘플 데이터에 대한 신호처리로 비콘 프레임과 같은 주기성을 찾는 방법에 대해 분석되었다. IEEE 802.11 네트워크와 중첩된 무선 채널에서 IEEE 802.15.4 노드들의 CSMA-CA 알고리즘의 동작에 대해서 설명하였다. 하나의 IEEE 802.15.4 장치로 다수의 IEEE 802.15.4 채널에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 수행하는 방법을 그 알고리즘의 설명과 함께 제안하였다. 제안된 방법이 구현된 실험시스템으로 측정된 데이터를 분석할 때, WiFi 트래픽이 발생될 때 이와 연관된 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널에서 매체접근지연시간이 동시에 증가하는 것으로 관찰되었다. IEEE 802.15.4의 채널에서 다른 트래픽에 의한 간섭을 판단하기 위한 채널평가함수를 정의하였다. WiFi에 의해 간섭을 받는 IEEE 802.15.4 채널들을 탐색하기 위해 인접채널들에 대한 채널평가를 함께 고려하는 채널탐색방법을 제시하였고 실험결과는 WiFi에 의해 간섭이 일어나는 채널들을 올바르게 찾는 특성을 보인다.

☞ 주제어 : 간섭, IEEE 802.15.4, WiFi, CSMA-CA, 매체접근지연, 채널탐색

ABSTRACT

In this paper, a parallel backoff delay procedure on multiple IEEE 802.15.4 channels and a channel searching method considering the frequency spectrum of WiFi traffic are studied for IEEE 802.15.4 nodes to avoid the interference from WiFi traffic. In order to search the channels being occupied by WiFi traffic, we analyzed the methods measuring the powers of adjacent channels simultaneously, checking the duration of measured power levels greater than a threshold, and finding the same periodicity of sampled RSSI data as the beacon frame by signal processing. In an wireless channel overlapped with IEEE 802.11 network, the operation of CSMA-CA algorithm for IEEE 802.15.4 nodes is explained. A method to execute a parallel backoff procedure on multiples IEEE 802.15.4 channels by an IEEE 802.15.4 device is proposed with the description of its algorithm. When we analyze the data measured by the experimental system implemented with the proposed method, it is observed that medium access delay times increase at the same time in the associated IEEE 802.15.4 channels that are adjacent each other during the generation of WiFi traffic. A channel evaluation function to decide the interference from other traffic on an IEEE 802.15.4 channel is defined. A channel searching method considering the channel evaluations on the adjacent channels together is proposed in order to search the IEEE 802.15.4 channels interfered by WiFi, and the experimental results show that it correctly finds the channels interfered by WiFi traffic.

☞ keyword : interference, IEEE 802.15.4, WiFi, CSMA-CA, medium access delay, channel search

1. 서 론

중심 주파수가 2.4 GHz인 ISM (industrial, scientific, and medical) 대역을 사용하는 IEEE 802.15.4 프로토콜을 기반으로 하는 무선센서네트워크와 WiFi를 사용하는 네트워크가 동일하거나 서로 인접한 공간에 설치되어 운용되는 경우가 증가하는 추세에 있다. 그런데 무선센서네트워크

¹ Dept. of Information & Communication Eng., Hoseo Univ., Choongnam-Do, 336-795, Korea.

* Corresponding author (mlsong@hoseo.edu)

[Received 01 February 2014, Reviewed 04 February 2014, Accepted 10 Mar 2014]

가 WiFi 네트워크와 주파수 스펙트럼이 서로 겹치는 대역에 채널이 설정되고 WiFi 네트워크에서 발생하는 트래픽의 부하가 클 경우, WiFi 트래픽 신호의 세기가 통신에 방해가 될 정도로 세계 나타나는 위치의 무선센서네트워크 노드들은 데이터를 송수신할 때 전송지연시간, 전송실패, 수신된 프레임 오류의 증가와 같은 현상이 발생되어 응용계층에서 무선센서네트워크에 요구되는 전송 품질을 보장할 수 없다.

이와 같은 WiFi 트래픽의 간섭을 방지하거나 극복하기 위해 일반적으로 두 무선네트워크가 사용하는 채널이 서로 겹치지 않도록 설정하거나 운용중인 채널을 변경하는 방법을 고려할 수 있다. 그런데 WiFi 네트워크는 액세스포인트(access point)에서 무선채널을 설정할 수 있고, 한번 채널이 설정되면 관리자에 의해 변경되기 전까지는, 주파수 스펙트럼이 동일하거나 부분적으로 중첩되는 채널을 사용하도록 설정된 주변의 다른 네트워크들로 인해 사용자의 전송지연시간이 커지더라도, 설정된 채널이 계속 유지된다. 그리고 WiFi 네트워크에서 발생하는 트래픽은 무선센서네트워크와는 다른 목적을 지원하기 위해 고안된 것이므로 데이터가 집중적으로 발생하는 정도가 무선센서네트워크에 비해 상당히 높은 경우 무선센서네트워크의 노드들의 데이터 전송에 미치는 영향이 크다. 따라서 무선네트워크를 구성하는 노드들에게, 운용중인 채널에서 발생하는 간섭을 탐지한 후 채널을 변경하기로 결정된 경우, 간섭이 없거나 적은 채널 또는 WiFi 트래픽의 간섭이 없는 채널을 찾아 새로운 채널에서 동작하는 기능이 요구된다.

어떤 채널에서 동작중인 무선센서네트워크의 노드가 그 채널에서 발생하는 간섭이나 채널의 품질을 평가하기 위해서 데이터전송률, RTT(round trip time), FER(frame error rate), PLR(packet loss ratio), 매체접근지연시간 등과 같이 성능과 관련된 요소에 대해 연구되었다[1-5]. 또한 Texas Instrument사의 CC2420, CC2430, CC2520, CC2530과 같이 IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는 부품에서 제공되는 RSSI(received signal strength indicator)와 LQI(link quality indicator)를 이용하여 무선채널과 수신된 신호를 평가하는 연구가 이루어졌다[6-12].

그리고 새로운 채널을 탐색할 때 WiFi에 의해 점유된 채널을 피하기 위해 WiFi 한 채널의 스펙트럼은 IEEE 802.15.4 채널에서는 인접한 다수의 채널에 걸쳐서 나타나는 특성을 활용하여 IEEE 802.15.4 장치에 의해 WiFi 신호를 탐색하는 방법에 대해 연구되었다[13]. 이 방법은 다수의 IEEE 802.15.4 장치를 각각 서로 인접한 채널에

설정된 후 각 장치에서 설정된 채널에 대해 RSSI값을 샘플(sample)하여 신호가 존재한다고 판단되는 기준치를 넘는 RSSI 샘플의 개수를 이용하여 각 채널에서 신호의 유무를 판정한다. 그리고 같은 기간 동안 각 장치에서 판정한 결과를 이용하여 인접한 채널들에서 동시에 신호가 있다고 판정될 경우 해당 채널에 대응되는 WiFi 채널에 WiFi 트래픽이 존재한다고 판정하는 방법이다[14]. 그리고 이와 유사한 다른 방법은 서로 인접한 두 개의 IEEE 802.15.4 채널에 설정된 두 개의 IEEE 802.15.4 장치들에서 IEEE 802.15.4 채널에 대해 샘플된 RSSI 값이 WiFi 신호가 존재한다고 판단되는 수준보다 높은 상태에서 지속되는 시간이 WiFi의 특정 프레임이 발생될 때의 지속시간과 일치하는 사건이 동시에 탐지될 경우 WiFi 트래픽이 존재한다고 판정하고 16개의 IEEE 802.15.4 채널 전체를 순차적으로 탐색하는 방법이다[15]. 그런데 이러한 방법들은 다수의 무선센서네트워크 장치들을 사용해야 하는 비용적인 문제가 있다.

한편, WiFi 네트워크를 구성하는 액세스포인트에서 주기적으로 비콘(beacon) 신호가 발생되는데, IEEE 802.15.4 프로토콜을 전송수단으로 이용하는 ZigBee 장치가 액세스포인트에서 발생하는 비콘신호를 찾는 방법이 연구되었다. IEEE 802.15.4 프레임의 송수신기능이 있는 칩의 RSSI 레지스터값을 주기적으로 샘플하고 CMF(common multiple folding) 알고리즘을 적용하여 신호처리를 하고 주기성을 찾으면 WiFi의 비콘프레임이 발생된 것으로 판단하는데, 이 방법은 샘플된 신호의 주기성을 찾기 위해 많은 양의 샘플 데이터를 저장해야 하고 이를 신호처리하기 위한 연산의 부담이 커서 성능이 높지 않고 메모리 용량이 크지 않은 무선센서네트워크의 노드들에 사용되는 일반적인 IEEE 802.15.4 프로토콜을 지원하는 칩에 구현되기에는 어려운 문제가 있다[16].

이 논문에서는 WiFi 트래픽의 간섭을 피해 사용가능한 무선채널을 탐색하기 위해 기존의 연구방법들이 다수의 IEEE 802.15.4 장치를 사용하는 비용문제나 채널에 대해 샘플된 데이터들에 대한 프로세서의 처리부담을 고려하여 하나의 IEEE 802.15.4 장치로 CSMA-CA(carrier sense multiple access - collision avoidance) 알고리즘을 활용하여 다수의 IEEE 802.15.4 채널들에 대해 동시에 병렬적으로 백오프지연(backoff delay)과정을 진행하여 각 채널에 대한 매체접근지연시간을 구하는 방법을 고안한다. 그리고 이 과정을 통해 구한 각 채널에 대한 매체접근지연시간을 이용하여 WiFi 트래픽에 의해 IEEE 802.15.4에 간섭으로 작용하는 채널을 탐색하는 방법을 제안하고 특

성을 분석한다.

이를 위해 2장에서 매체접근제어 (medium access control) 기능으로 CSMA-CA 알고리즘을 사용하는 IEEE 802.15.4 노드의 매체접근지연시간에 대해서 분석하고 하나의 IEEE 802.15.4 장치로 다수의 채널에 대해 병렬적으로 매체접근지연시간을 구하는 방법과 알고리즘에 대해서 기술한다. 3장에서는 2장에서 설명한 병렬적인 백오프지연방법을 IEEE 802.15.4 장치에 구현하여 매체접근지연시간을 측정하기 위한 실험시스템을 설명한다. 그리고 WiFi 트래픽의 부하조건과 병렬적인 백오프지연방법에 사용되는 기준치들의 변화에 대해 측정된 결과를 이용하여 제안된 방법의 특성을 분석한다. 4장에서 WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4의 각 채널에 진행중인 간섭을 판단하기 위한 채널평가함수를 정의한다. 그리고 간섭을 피하기 위해서 새로운 채널을 탐색할 때 WiFi 트래픽의 주파수 특성을 고려한 IEEE 802.15.4 채널탐색방법에 대해서 제안하고 실험적으로 그 방법의 타당성을 확인하고 5장에서 결론을 맺는다.

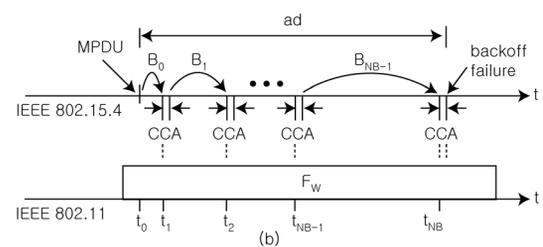
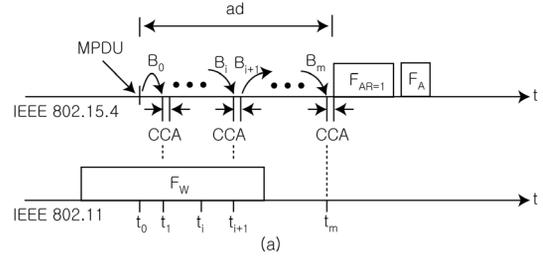
2. 병렬적인 백오프지연방법

2.1 IEEE 802.15.4 프로토콜의 CSMA-CA

IEEE 802.15.4의 CSMA-CA는 매체접근제어계층 프로토콜에서 MPDU (MAC protocol data unit)이 생성되면 난수발생기에 의해 발생된 값으로 백오프타이머 (backoff timer)를 초기화시키고 이 타이머가 줄어들어 0이 될 때 CCA (clear channel assessment) 기능으로 무선채널이 비어있다고 판단되면 프레임을 전송하고 그렇지 않은 경우 더 넓은 범위에서 선택되는 새로운 난수를 발생시켜서 다시 지연한다. 단, 백오프타이머가 줄어들고 있는 동안에는 무선채널이 비어있는지 지속적으로 확인하지는 않는다. 백오프지연을 반복할 때마다 발생하는 난수의 범위는 지수함수 모양으로 증가한다[17]. 백오프지연 횟수가 규정된 기준치를 넘게 되면 백오프지연실패로 판단한다.

(그림 1)에 IEEE 802.15.4 채널에 IEEE 802.11 트래픽 신호 F_w 가 나타날 때, IEEE 802.15.4 노드들이 시각 t_0 에서 발생된 MPDU를 전송하기 위해 채널에 대해 CSMA-CA 알고리즘이 적용되는 백오프지연과정을 나타냈다.

(그림 1) (a)에서 백오프지연차수를 i 로 표현할 때, 백오프지연차수 i 의 백오프지연시간 B_i 의 크기는 식 (1)과



(그림 1) IEEE 802.15.4 CSMA-CA 동작
(Figure 1) IEEE 802.15.4 CSMA-CA operation

같이 결정되고 단위는 길이가 320 μ s인 단위백오프슬롯 (unit backoff slot)이다.

$$B_i = RV(2^{BE_i} - 1) \quad (1)$$

여기서 백오프지연되는 회수의 최대치를 NB라 할 때 $0 \leq i \leq NB - 1$ 이고 함수 $RV(x)$ 는 0과 x 사이에서 균일분포를 갖는 정수형 난수이다. 그리고 $i > 0$ 인 경우에 BE_i 는 식 (2)와 같이 결정된다.

$$BE_i = \min(BE_{i-1} + 1, \text{macMaxBE}) \quad (2)$$

여기서 함수 $\min(a, b)$ 는 a 와 b 중 최소값을 택하며, $BE_0 = \text{macMinBE}$ 이고 macMinBE 와 macMaxBE 는 각각 식 (1)의 지수항에 적용되는 변수 BE_i 의 최소값과 최대값을 의미한다. IEEE 802.15.4 표준에는 백오프지연차수의 최대치를 $\text{macMaxCSMABackoffs}$ 로 규정하고 있고 (그림 1) (b)와 같이 CCA 기능에 의해 채널이 계속 사용중이어서 백오프지연차수가 이 값보다 크게 되면 채널접근이 실패했다고 판단한다.

IEEE 802.15.4 송신기에서 이와 같은 백오프지연과정을 거쳐서 (그림 1) (a)와 같이 백오프지연차수 m 에서

채널이 비게 되어 MPDU를 포함하는 프레임 $F_{AR=1}$ 이 전송되고 수신기가 이 프레임에 대한 응답프레임 F_A 를 전송하면, MPDU의 발생순간부터 채널이 비는 것을 확인하거나 백오프지연과정이 실패할 때까지 걸리는 매체접근지연시간 ad 는 식 (3)과 같이 표현될 수 있다

$$ad = \sum_{i=0}^m \{B_i + CCA\} \text{ [slot]} \quad (3)$$

여기서 단위 [slot]은 단위백오프슬롯의 길이인 $320 \mu s$ 이고 CCA기능에 소요되는 시간은 IEEE 802.15.4 표준에 $128 \mu s$ 로 규정되어 있으므로 $CCA = 128/320 \text{ [slot]}$ 으로 표현한다.

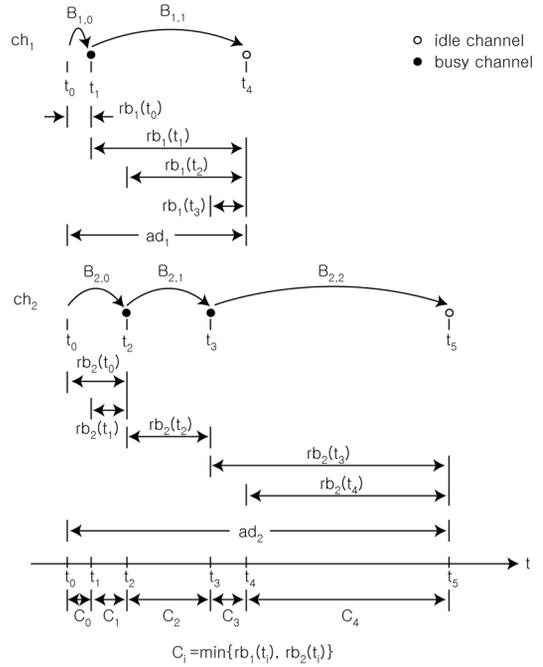
(표 1) CSMA-CA 관련 파라미터들
(Table 1) Parameters on CSMA-CA

	범 위	권고치
macMaxBE	3 ~ 8	5
macMinBE	0 ~ macMaxBE	3
macMaxCSMABackoffs	0 ~ 5	4

한편, IEEE 802.15.4 표준에서 CSMA-CA 알고리즘의 동작과 관련된 파라미터들은 표 1과 같이 규정되어 있고 이 논문에서는 CSMA-CA 관련 파라미터들에 대해 표준의 권고치를 사용한다. 따라서 백오프지연과정에 사용되는 난수는 백오프지연차수에 따라 순차적으로 최대값이 $2^3 - 1, 2^4 - 1, 2^5 - 1, 2^6 - 1, 2^7 - 1$ 인 음이 아닌 정수의 범위에서 선택된다. IEEE 802.15.4 채널에 다른 트래픽의 부하가 커서 백오프지연차수가 증가할수록 더 큰 범위에서 난수를 택하지만, CCA 기능을 수행하는 시간은 $128/320 \text{ [slot]}$ 이어서 상대적으로 작아지므로 이 논문에서는 앞으로 CCA 시간을 무시하고 설명한다.

2.2 병렬적인 백오프지연과정

IEEE 802.15.4 CSMA-CA 알고리즘은 각 채널에서 백오프지연과정에 사용되는 타이머가 종료될 때마다 CCA 기능으로 그 채널이 사용중인지 판단해야 하므로, 하나의 IEEE 802.15.4 송수신기로 다수의 채널에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 진행하기 위해서는 모든 채널에서 발생하는 백오프지연차수의 종료시점에 그와 연관된 채널로 중심주파수를 변경하고 변경된 채널이 사용중인지



(그림 2) 병렬적인 백오프지연과정
(Figure 2) Parallel backoff delay procedure

를 평가할 수 있어야 한다. 그리고 백오프지연과정이 진행중인 채널들 중에서 현재 차수의 백오프지연종료시점까지 잔여슬롯수가 최소인 채널의 채널번호를 저장하고 그 채널의 잔여슬롯수를 타이머의 초기값으로 설정하고 타이머를 동작시킨다. 타이머가 종료되는 사건은 타이머의 동작과 함께 저장되었던 채널번호가 나타내는 채널의 백오프지연과정 중 한 차수의 종료시점에 도달했음을 의미하므로 그 채널이 비어있는지를 평가하고 다음 차례의 백오프지연종료시점을 찾아 타이머를 동작시키는 과정을 모든 채널에 대해 채널이 비어있다는 것을 확인하거나 백오프지연과정이 실패할 때까지 반복한다.

IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는 장치 1개보다 다수의 채널에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 실행하면서 매체접근지연시간을 구하는 방법을 설명하기 위해 (그림 2)에 두 개의 채널에 대한 방법을 나타냈다. 그림에서 서로 다른 주파수 대역의 채널 ch_1, ch_2 에서 서로 독립적으로 CSMA-CA 알고리즘이 적용되어 시각 t_0 에서 동시에 시작된 백오프지연과정이 각각 2회, 3회 백오프지연을 거친 후 채널이 비어있는 상태를 맞게 된다. 채널 ch_1, ch_2 에서 겪는 각 차수의 백오프지연슬롯의 개수는

각각 $\{B_{1,0}, B_{1,1}\}$ 과 $\{B_{2,0}, B_{2,1}, B_{2,2}\}$ 로 표현되고 식 (1), (2)를 이용하여 결정된다. 각 채널에서 각 차수의 백오프지연 후에 CCA기능을 이용하여 채널이 비어있는지 평가하는 시점은 각각 $\{t_1, t_4\}$, $\{t_2, t_3, t_5\}$ 로 나타났다. (그림 2)에서 $rb_k(t_i)$ 는 시각 t_i 에서 채널 ch_k 에 현재 진행중인 차수의 백오프지연종료시점까지 남아있는 슬롯, 즉 잔여슬롯의 개수를 의미한다.

시각 t_0 에서 채널 ch_1, ch_2 에 대해 발생된 백오프지연 슬롯수가 각각 $B_{1,0}, B_{2,0}$ 이므로, 이 시점에서 각 채널의 백오프지연종료시점까지 잔여슬롯은 $rb_1(t_0) = B_{1,0}$ 과 $rb_2(t_0) = B_{2,0}$ 이다. 그리고 타이머에 초기화되는 값은 두 채널 중 잔여슬롯이 적은 채널의 잔여슬롯으로 $C_0 = \min\{rb_1(t_0), rb_2(t_0)\}$ 과 같이 결정되는데 (그림 2)에서는 $rb_1(t_0) < rb_2(t_0)$ 이므로 $C_0 = rb_1(t_0)$ 가 된다. C_0 로 초기화된 타이머가 종료되는 시각 t_1 에서 채널 ch_1 은 사용중으로 판정되어 크기가 $B_{1,1}$ 인 차수 1의 백오프지연에 들어가야 하므로 차수 1의 백오프지연 $B_{1,1}$ 의 종료시점까지 잔여슬롯은 $rb_1(t_1) = B_{1,1}$ 이다. 한편, 시각 t_1 에서 채널 ch_2 는 차수 0의 백오프지연 $B_{2,0}$ 가 진행중이고 $B_{2,0}$ 의 종료시점까지 잔여슬롯은 $rb_2(t_1) = B_{2,0} - B_{1,0}$ 이다. 따라서 시각 t_1 에서 타이머에 새롭게 초기화되는 값은 $C_1 = \min\{rb_1(t_1), rb_2(t_1)\}$ 으로 결정되고 타이머가 동작된다. 이 후 타이머가 매번 종료될 때마다 채널이 비어있다고 판정되거나 최대백오프지연차수까지 이와 같은 방법을 반복함으로써 두 개의 채널 ch_1, ch_2 에 대해 백오프지연과정을 진행할 수 있게 된다. 시각 t_2, t_3 에서는 $C_2 = \min\{rb_1(t_2), rb_2(t_2)\}$, $C_3 = \min\{rb_1(t_3), rb_2(t_3)\}$ 로 타이머의 값을 결정하고, t_4 에서는 채널 ch_1 이 비어있다고 판정되므로 남은 채널 ch_2 의 잔여슬롯으로 $rb_2(t_4)$ 로 타이머의 값 C_4 를 결정한다. 이와 같은 방법으로 두 채널에 대해 백오프지연과정을 진행하면서 각 채널별로 타이머에 초기화되는 값이 누적되는 변수를 유지해나가면 백오프지연종료시점까지 누적된 값은 각 채널에 대한 매체접근지연시간을 의미하게 된다. (그림 2)의 예에서는 채널 ch_1, ch_2 에 대한 매체접근지연 시간 ad_1, ad_2 는 식 (4), (5)와 같이 구해진다.

$$ad_1 = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 \quad (4)$$

$$ad_2 = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (5)$$

2.3 병렬적인 백오프지연 알고리즘

이 절에서는 앞 절에서 예를 들어 설명한 하나의 IEEE 802.15.4 장치에 의해 두 개의 IEEE 802.15.4 채널에 대해 병렬적으로 수행된 백오프지연과정을 다수의 IEEE 802.15.4 채널에 대해 적용하기 위한 알고리즘에 대해 기술한다.

병렬적인 백오프지연과정이 진행될 채널의 개수를 n 이라 할 때, n 차원 배열로 표현될 수 있는 식 (6), (7), (8), (9), (10), (11) 같은 변수목록들이 유지 및 갱신되어야 한다.

$$CL = \{ch_1, ch_2, \dots, ch_n\} \quad (6)$$

$$CD = \{ \} \rightarrow CD = CL \quad (7)$$

$$RB = \{rb_1, rb_2, \dots, rb_n\} \quad (8)$$

$$NB = \{nb_1, nb_2, \dots, nb_n\} \quad (9)$$

$$AD = \{ad_1, ad_2, \dots, ad_n\} \quad (10)$$

$$BF = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \quad (11)$$

여기서, CL은 백오프지연과정이 진행될 채널목록, CD은 공집합으로 시작해서 백오프지연과정이 종료되면 CL과 같아지는 백오프지연과정이 종료된 채널목록, RB는 백오프지연과정에서 어떤 사건이 발생한 순간에 각 채널별로 진행중인 현재 차수의 백오프지연종료시점까지 남아있는 잔여슬롯목록, NB는 현재 진행중인 백오프지연의 차수목록, AD는 병렬적인 백오프지연과정의 시작에서부터 어떤 사건에 이르기까지 구한 채널에 대한 매체접근지연시간목록, BF는 병렬적으로 진행된 백오프지연과정의 결과를 의미한다. 식 (6), (8), (9), (10), (11)에 표현된 목록은 임의의 채널 ch_k 에 대해 이와 연관된 rb_k, nb_k, ad_k, b_k 의 원소를 각각 갖는다. 여기서 k 는 $1 \leq k \leq n$ 인 정수이다.

한편, 잔여슬롯목록 RB에서 최소값을 갖는 채널을 결정하는 함수를 $mRB()$ 라 할 때, 병렬적인 백오프지연 과정은 다음과 같이 세 단계로 표현된다.

2.3.1 단계 1 : 목록 초기화

병렬적인 백오프지연과정은 목록 CD, RB, NB, AD, BF를 식 (12), (13), (14), (15), (16)과 같이 초기화한 후 시작된다.

$$CD = \{ \} \quad (12)$$

$$NB = \{nb_k = 1 | \forall ch_k \in CL\} \quad (13)$$

$$RB = \{rb_k = RV(2^{BE_0} - 1) | \forall ch_k \in CL\} \quad (14)$$

$$AD = \{ad_k = 0 | \forall ch_k \in CL\} \quad (15)$$

$$BF = \{b_k = 1 | \forall ch_k \in CL\} \quad (16)$$

식 (12)에서 목록 CD는 초기에 병렬적인 백오프지연 과정이 끝난 채널이 없으므로 공집합으로 설정된다. 식 (14)에서 BE_0 는 IEEE 802.15.4 표준에 규정된 macMinBE를 의미한다. 식 (16)에서 b_k 는 실패일 경우 1, 성공일 경우 0으로 표시되는데 1로 초기화한 후 차후에 백오프지연이 성공하면 0으로 바꾼다.

2.3.2 단계 2 : 타이머 설정 및 목록 갱신

(a) 함수 $mRB()$ 로 백오프지연잔여슬롯이 최소인 채널 ch_m 을 찾아 채널 ch_m 의 잔여슬롯 rb_m 으로 백오프지연 타이머를 초기화한다. 만일 더 이상 백오프지연될 채널이 없는 경우에는 탐색을 종료한다.

(b) 백오프지연과정이 종료되지 않은 모든 채널들 $ch_k \in CL - CD$ 에 대해 식 (17), (18)과 같이 백오프지연잔여슬롯 rb_k 와 매체접근지연시간 ad_k 를 갱신한다.

$$rb_k = rb_k - rb_m \quad (17)$$

$$ad_k = ad_k + rb_m \quad (18)$$

(c) 단계 2의 (a)에서 초기화된 백오프지연 타이머를 동시시킨다.

2.3.3 단계 3 : 타이머 종료시 목록 갱신

백오프타이머의 종료시 채널 ch_m 에 대해 CCA 기능을 실행하여 비어있다고 판정되면 목록 CD에 채널 ch_m 을 추가하고 채널탐색결과를 $b_m = 0$ 으로 설정한다. 만일 채널 ch_m 이 사용중이라 판정되었는데, 이미 최대백오프지연차수까지 진행된 경우에는 채널 ch_m 을 목록 CD에 추가하고, 최대백오프지연차수보다 적게 진행된 경우에는 다음 차수의 백오프지연을 위해 식 (19), (20), (21)과 같이 채널 ch_m 에 대한 백오프지연차수 nb_m , 백오프지연잔여슬롯 rb_m , 매체접근지연시간 ad_m 을 갱신한다. 단계 3의 과정을 마치면 단계 2로 돌아간다.

$$nb_m = nb_m + 1 \quad (19)$$

$$rb_m = RV(x), \text{ 여기서 } x = 2^{BE_{(nb_m - 1)}} - 1 \quad (20)$$

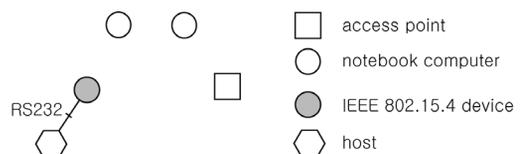
$$ad_m = ad_m + rb_m \quad (21)$$

위에서 설명한 알고리즘에서 단계 2의 (a)에서 함수 $mRB()$ 로 백오프지연잔여슬롯이 최소인 채널을 찾을 때, 동일한 값의 잔여슬롯을 갖는 채널이 다수 존재하는 경우 채널번호가 작은 채널을 선택한다.

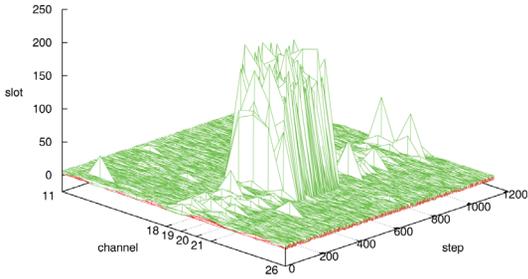
3. 병렬적인 백오프지연과정을 이용한 WiFi 트래픽의 간섭현상 측정 및 분석

(그림 3)에 이 논문에서 제안된 무선채널의 병렬적인 백오프지연방법을 이용하여 구한 매체접근지연시간의 특성을 실험적으로 알아보기 위한 시스템을 나타냈다. 이 시스템은 WiFi 트래픽을 발생시키기 위해 노트북컴퓨터와 액세스포인트, 발생하는 WiFi 트래픽이 IEEE 802.15.4 채널에 미치는 영향을 측정하기 위한 IEEE 802.15.4 프레임 송수신기능이 있는 장치, 그리고 IEEE 802.15.4 장치에서 IEEE 802.15.4의 채널에 대해 병렬적인 백오프지연과정에서 유지되는 변수들과 내부 상태를 감시하고 사후처리와 분석을 위해 데이터를 RS232 포트를 통해 수집하는 호스트 컴퓨터로 구성되어 있다.

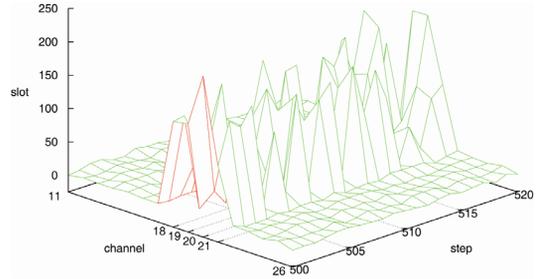
노트북컴퓨터에서는 유무선 네트워크에 대한 벤치마킹 도구인 “Nuts About Nets, LLC”의 “netstress” 프로그램을 사용하여 MTU (maximum transfer unit), TCP 세그먼트 크기 (segment size), 초당 발생하는 패킷수, TCP 접속 개수 등과 같은 요소들을 원하는 조건으로 설정하여 WiFi 트래픽을 발생시킨다. IEEE 802.15.4 장치는 IEEE 802.15.4 프레임의 송수신 기능이 있는 Texas Instrument사의 CC2530 칩이 포함되어 있는 CC2530EM을 RS232 인터페이스가 제공되는 SmartRF05EB와 결합하여 사용한다. 하나의 CC2530 칩에 2장에서 설명한 병렬적인 백오프지연 알고리즘을 구현하고 WiFi 트래픽 부하를 변화



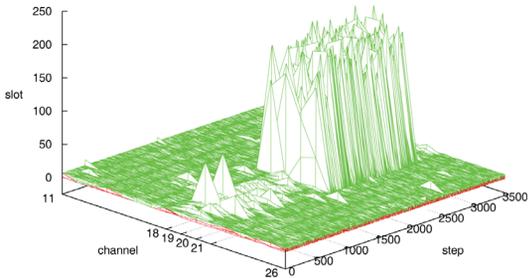
(그림 3) 제안된 방법의 시험을 위한 시스템 (Figure 3) System to test the proposed method



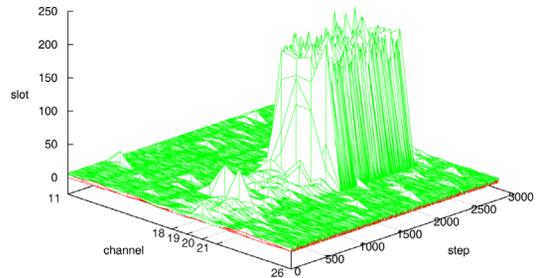
(그림 4) WiFi = 1016 패킷/초, $CCA_{TH} = -56$ dBm
 (Figure 4) WiFi = 1016 packet/s, $CCA_{TH} = -56$ dBm



(그림 5) 그림 4의 확대도
 (Figure 5) Zoomed-in plot of figure 4



(그림 6) $CCA_{TH} = -50$ dBm
 (Figure 6) $CCA_{TH} = -50$ dBm



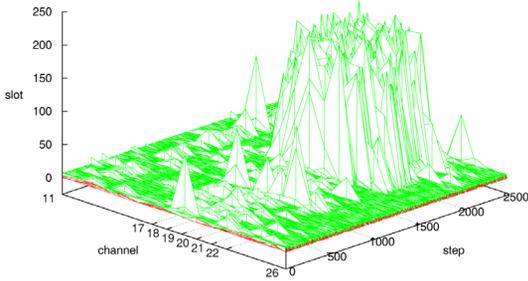
(그림 7) $CCA_{TH} = -60$ dBm
 (Figure 7) $CCA_{TH} = -60$ dBm

시키거나 CCA 기능에서 채널이 비어있다고 판정되는 기준치를 변경시키면서 다수의 IEEE 802.15.4 채널에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 진행하여 각 채널에 대한 매체접근지연시간을 측정한다.

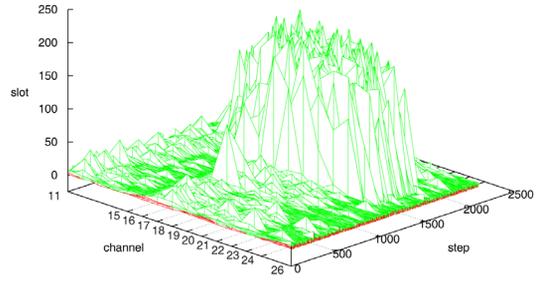
이 논문에서는 WiFi 채널 8을 사용하는 노트북컴퓨터에서 TCP 프로토콜의 MTU 크기를 1500 byte로 설정한 상태에서 WiFi 트래픽을 발생시키면서 실험을 수행하였다. (그림 4)는 초당 발생되는 패킷수가 1016개일 때, IEEE 802.15.4 채널 11부터 채널 26까지 16개의 채널에 대해 IEEE 802.15.4 장치에서 CCA 기준치 CCA_{TH} 를 -56 dBm으로 설정한 상태에서 병렬적인 백오프지연과정에 의해 측정된 매체접근지연시간을 나타낸 것이다. 여기서 초당 1016개의 패킷은 측정을 위한 실험용 WiFi 네트워크에서 데이터전송율 (throughput)이 더 이상 증가하지 않고 포화되기 시작하는 양이다. 16개의 채널에 대해 약 1200회를 측정하는 동안 약 390에서 610회 사이의 시간 동안 WiFi 트래픽을 발생시켰다. 또한 (그림 5)는 WiFi 트래픽이 발생하는 구간 중 500회에서 520회를 상세하게 표현한 것이다. 전체적으로 볼 때, WiFi 트래픽이 나타나지 않는 채널이나 시간에서는 매체접근지

연시간이 7 슬롯 이하로 낮게 나타난다. 이것은 IEEE 802.15.4의 차수 0의 백오프지연의 최대크기와 같은 것으로서 채널을 점유하는 신호가 없기 때문에 차수 0의 백오프지연 후 채널이 비어있다고 판정되기 때문이다. 한편, WiFi 트래픽이 나타나는 경우에는 매체접근지연시간이 IEEE 802.15.4 채널 18, 19, 20, 21과 같이 서로 인접한 여러 채널에서 동시에 급격하게 증가된 상태를 유지하며 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 측정결과는 어떤 WiFi 채널에서 트래픽 부하가 WiFi 채널의 주파수 스펙트럼과 중첩되는 IEEE 802.15.4 채널들에서 동시에 간섭을 일으킨다는 사실을 확인하는 것이다.

(그림 6, 7, 8, 9)는 IEEE 802.15.4 장치에서 CCA 기준치를 -50 dBm, -60 dBm, -70 dBm, -80 dBm 으로 변경시킨 상태에서 앞에서 발생시킨 것과 동일한 WiFi 채널에서 동일한 부하특성을 갖는 WiFi 트래픽을 발생시킬 때, IEEE 802.15.4 채널에서 매체접근지연시간을 측정한 것이다. CCA 기준치가 -50 dBm, -60 dBm인 경우에는 대부분의 채널들에서 매체접근지연시간이 작고, WiFi 트래픽이 발생하는 동안에는 IEEE 802.15.4 채널 18, 19, 20, 21에서 매체접근지연시간이 크게 증가된 상태로 나타나고



(그림 8) $CCA_{TH} = -70$ dBm
(Figure 8) $CCA_{TH} = -70$ dBm



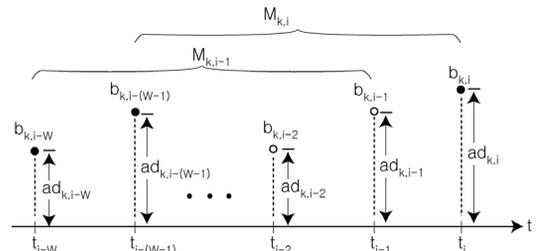
(그림 9) $CCA_{TH} = -80$ dBm
(Figure 9) $CCA_{TH} = -80$ dBm

있다. 그리고 CCA 기준치가 -70 dBm인 경우에는 채널 17, 18, 19, 20, 21, 22에서 -80 dBm인 경우에는 채널 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23에서 매체접근지연시간이 크게 증가하는 현상을 보인다. 즉, CCA 기준치가 감소할수록, WiFi 트래픽이 발생되고 있는 동안, 더 넓은 대역의 서로 인접한 채널에서 매체접근지연시간이 증가하는 현상이 나타나고 있다. 이러한 현상은 IEEE 802.11 물리계층표준에서 전송되는 IEEE 802.11 신호의 스펙트럼이 주 대역에서 일정한 수준을 갖고 주 대역에서 멀어질수록 주 대역에 비해 낮은 세기를 갖도록 규정하고 있지만[18], IEEE 802.15.4 장치에서 CCA 기준치가 낮은 경우에는 IEEE 802.11 주 대역 밖의 세기가 작은 신호가 IEEE 802.15.4 채널의 CCA 기능에 영향을 주기 때문이다. 또한 이 실험은 주변에 많은 WiFi 네트워크가 같은 채널 또는 다른 채널에서 운용되고 있는 건물에서 수행되었기 때문에, CCA 기준치가 낮을수록 시험용 WiFi 트래픽이 발생되지 않는 대역과 시간에서도 다른 WiFi 네트워크의 트래픽으로 인해 매체접근지연시간이 점차로 증가하는 현상을 볼 수 있다.

이와 같은 실험 결과를 통해서 볼 때 WiFi의 어떤 채널에서 WiFi 트래픽 부하가 발생하면 IEEE 802.15.4 노드에서는 WiFi 채널의 주파수 스펙트럼과 겹치는 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널에서 동시에 매체접근지연시간이 증가하는 것으로 나타난다.

4. WiFi 트래픽의 간섭을 피하기 위한 IEEE 802.15.4 채널탐색

IEEE 802.15.4 노드에서 WiFi 트래픽에 의해 간섭현상이 나타나고 있을 때 간섭을 극복하기 위한 방안 중에 하



(그림 10) 채널 ch_k 의 평가를 위한 데이터

(Figure 10) The data for evaluation of channel ch_k

나로 간섭이 없는 새로운 채널에서 동작하는 것이 고려될 수 있다. 이를 위해서는 WiFi 트래픽의 간섭이 없는 채널을 탐색해야 하는데 여기에서는 앞에서 설명한 IEEE 802.15.4의 다수의 채널에 대한 병렬적인 백오프지연방법을 통해 구한 매체접근지연시간을 활용하여 어떤 채널이 WiFi 트래픽에 의해 영향을 받고 있는지 판단할 수 있는 방법에 대해 설명한다.

2장에서 표현된 병렬적인 백오프지연과정을 거치면 이 과정에 포함된 모든 채널에 대해서 매체접근지연시간과 백오프지연과정의 성공여부를 알 수 있는 식 (10)과 식(11)의 목록 AD, BF와 같은 정보가 동시에 구해진다. (그림 10)에 IEEE 802.15.4의 채널들에 대한 병렬적인 백오프지연과정에서 구한 데이터를 이용하여 채널 ch_k 에 대해 시각 t_i 에서 간섭평가함수 $M_{k,i}$ 를 구하는 과정을 나타냈다. 여기에서 $ad_{k,i}$ 와 $b_{k,i}$ 는 각각 매체접근지연시간과 백오프지연과정의 성공여부를 의미하는데, $ad_{k,i}$ 는 백오프슬롯의 단위로 표현되고 $b_{k,i}$ 는 1인 경우 백오프지연과정의 실패를, 0인 경우 성공을 의미한다. 그리고 간섭평가함수를 구하기 위해 가장 최근 W개의 매체접근지연

시간과 백오프지연과정결과를 이용한다. 시각 t_i 에서 채널 ch_k 에 대한 간섭평가함수는 식 (22), (23)를 계산한 후 (24)와 같이 계산할 수 있다.

$$g_{k,i} = u(ad_{k,i} > TH) \quad (22)$$

$$h_{k,i} = (1 - g_{k,i})(1 - b_{k,i})u(g_{k,i-1} + g_{k,i-2} > 0) \quad (23)$$

$$M_{k,i} = \sum_{j=0}^{W-1} \{g_{k,i-j}(1 - b_{k,i-j}) + \alpha b_{k,i-j}\} + h_{k,i} \quad (24)$$

위의 식에서 함수 $u(x)$ 는 변수 x 가 참인 경우에 1, 거짓인 경우에 0으로 정의한다. 그러므로 식 (22)에서 매체접근지연시간 $ad_{k,i}$ 가 TH 보다 큰 경우에 1이 된다. 식 (24)에 표현된 간섭평가함수 $M_{k,i}$ 는 무선채널에 다른 트래픽으로 인한 간섭이 클수록 큰 값을 갖는 특성을 나타내도록 하기 위해 가장 최근에 구한 W개의 샘플에 대해 매체접근지연시간이 기준치보다 큰 경우에 1, 백오프지연이 실패한 경우에 $\alpha (> 1)$ 를 더하고 매체접근지연시간이 짧은 경우에는 아무것도 더하지 않는 구조이다. 그런데 매체접근지연시간이 직전까지는 크다가 순간적으로 갑자기 짧아지는 경우에도 트래픽이 완전히 사라진 것으로 판단할 수 없기 때문에 식 (23)과 같이 계산되는 $h_{k,i}$ 를 $M_{k,i}$ 에 반영한다. $h_{k,i}$ 는 식 (23)에 표현된 바와 같이 시각 t_i 에서 백오프지연이 성공하고 매체접근지연시간이 기준치보다 작은 경우에 직전 두 단계의 매체접근지연시간 ad_{i-1} , ad_{i-2} 중 적어도 어느 하나가 기준치보다 크면 1이 된다.

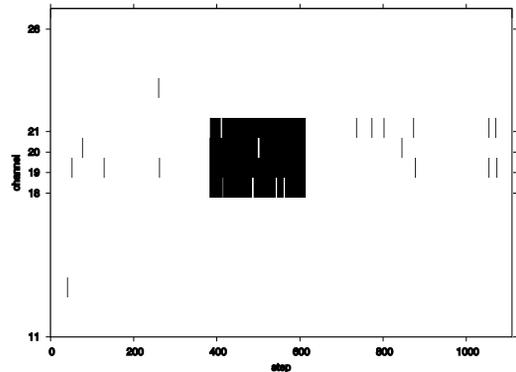
식 (24)에 표현된 간섭평가함수는 백오프지연과정실패에 가중치 α 를 부여할 수 있고 계산에 이용되는 샘플수 W를 조절하여 네트워크 트래픽 특성의 순간적인 변화를 따르지 아니면 더 오랜 시간 동안 유지되는 특성을 따를지를 결정할 수 있다. 그리고 식 (24)에 의해 구해지는 값은 W와 α 에 값에 따라 범위가 다르게 나타나지만 IEEE 802.15.4 노드가 채널을 탐색한 후 새로운 채널로 옮기기 위한 결정에 사용하기 위해서는 채널에 간섭이 되는 다른 트래픽의 유무와 같이 두 가지 상태 중 하나를 갖는 형태로 판정해야 하므로 이진수로 상태를 나타낼 수 있는 채널평가함수 식 (25)로 표현한다. 이 식에서 채널 ch_k 에 대해 가장 최근 W개의 샘플에 대해 구한 간섭평가결과 $M_{k,i}$ 가 기준치 M_{TH} 보다 큰 경우에 채널평가결과 $bm_{k,i}$ 는 1, 작은 경우에 0으로 표현된다.

$$bm_{k,i} = u(M_{k,i} \geq M_{TH}) \quad (25)$$

(그림 4)는 WiFi에서 초당 1016개의 패킷을 발생시킬 때, IEEE 802.15.4 노드의 CCA 기준치를 -56 dBm으로 설정하고 이 논문에서 제안한 병렬적인 백오프지연과정으로 구해지는 매체접근지연시간과 백오프지연성공여부를 포함하는 데이터 중 매체접근지연시간을 나타낸 것인데, 이와 동일한 데이터에 대해 식 (22), (23), (24), (25)를 이용하여 IEEE 802.15.4 노드에서 무선채널들에 대한 채널평가결과를 (그림 11)에 표현하였다. 여기에서 $\alpha=2$, $W=6$, $TH=20$, $M_{TH}=3$ 으로 설정하였다.

(그림 11)은 세로축에 IEEE 802.15.4 채널번호, 가로축에 시간의 진행을 스텝으로 표현하였고 검은 색은 다른 트래픽으로 인해 채널이 간섭을 받고 있는 상태, 흰 색 부분은 간섭이 없는 상태를 의미한다. 약 390에서 약 610 스텝의 기간 동안 IEEE 802.15.4 채널 18, 19, 20, 21에서 간섭이 집중적으로 나타나고 있는 것으로 판정되었는데 이것은 앞 장의 (그림 4)에서와 같은 기간 동안 WiFi 채널 8에서 WiFi 트래픽을 발생시켰기 때문에 이와 주파수 스펙트럼이 겹치는 IEEE 802.15.4 채널들에서 간섭이 나타나는 것으로 설명할 수 있다.

그리고 WiFi 트래픽이 집중적으로 발생되고 있는 부분을 제외한 나머지 채널과 시간에서 간헐적으로 짧은 시간 동안 채널이 간섭을 받고 있다고 판정된 것은 여러 채널에서 그리고 다양한 위치에 설치되어 운용되고 있는 다수의 WiFi 네트워크에서 발생하는 트래픽으로 추정된



(그림 11) IEEE 802.15.4 채널평가 ($bm_{k,i}$) 결과
(Figure 11) IEEE 802.15.4 channel evaluation result
($bm_{k,i}$)

다. 또한 시험용 WiFi 트래픽이 발생되고 있는 영역에서도 간헐적으로 흰 색으로 표시된 부분이 나타나는 것은 시험용 트래픽의 통계적 특성이 초당 평균 1016개의 패킷이 발생되도록 설정되었지만 이러한 통계적인 특성을 유지하는 가운데 해당 스펙트럼 성분이 일시적으로 나타나지 않는 것으로 보인다. 따라서 WiFi 트래픽 부하가 나타나지 않는 채널과 시간대에서 채널이 점유되었다고 판정하는 것을 방지하고, WiFi 트래픽 부하가 나타나고 있는 동안 일시적으로 채널에 간섭이 없다고 판정하는 경우를 방지하기 위해서 (그림 11)의 결과를 구하는데 사용된 방법을 개선해야 한다.

(그림 11)의 결과를 구한 과정은 IEEE 802.15.4 채널 전체에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 진행해서 구한 데이터를 기초로 각 채널의 평가결과를 표시했지만, WiFi 트래픽이 발생할 경우에 IEEE 802.15.4 채널들 사이에 나타나는 현상의 연관성은 고려되지 않았다. 그런데 3장에서 관찰한 바와 같이 WiFi 트래픽이 발생하면 이와 스펙트럼이 중첩되는 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널에서 동시에 매체접근지연시간이 증가하고 백오프지연과정실패가 늘어나는 현상이 나타난다. 그러므로 WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 채널에서 간섭이 발생하는 채널들을 탐색하고 결정할 때 어떤 IEEE 802.15.4 채널에 대해 그와 인접한 채널들의 상태변화도 반영해서 결정해야 한다.

시각 t_i 에서 채널 ch_k 에 대해 식 (25)와 같이 계산되는 최근 W 개의 채널평가결과 $bm_{k,i-(W-1)}, \dots, bm_{k,i}$ 에 의해 채널에 간섭이 진행중인지를 판단하기 위한 함수 $A_{k,i}$ 를 식 (26)과 같이 정의한다.

$$A_{k,i} = u\left(\sum_{j=0}^{W-1} bm_{k,j} > A_{TH}\right) \quad (26)$$

여기에서 $k = 11, \dots, 26$ 이고 $bm_{k,j}$ 가 0 또는 1의 값을 가지므로 이 함수는 최근 W 개의 채널평가결과 중 A_{TH} 회 이상 채널에 간섭이 있었다고 판정되면 $A_{k,i}$ 가 1, 그렇지 않은 경우에는 0이 됨으로써 $A_{k,i}$ 가 1인 경우에 간섭이 진행중인 의미를 갖는다.

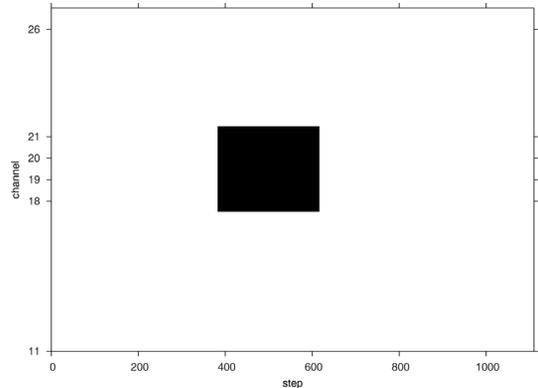
그리고 채널 ch_k 와 인접하는 채널들 ch_{k-1}, ch_{k+1} 에서 간섭이 진행중인지를 판정하기 위해 식 (27)과 같이 표현되는 함수 $nc_{k,i}$ 를 정의한다.

$$nc_{k,i} = u(A_{k-1,i} + A_{k+1,i} > 0) \quad (27)$$

여기에서 $k = 11, \dots, 26$ 이고 $A_{10,i}$ 와 $A_{27,i}$ 는 IEEE 802.15.4에서 사용되는 채널 밖의 주파수 대역에 해당하므로 0으로 지정한다. 그러므로 인접채널에서 진행중인 간섭을 고려하여 채널 ch_k 에 WiFi 트래픽의 간섭이 진행중인지를 판정하기 위해 식 (28)과 같이 수정된 채널평가 함수 $wm_{k,i}$ 를 정의할 수 있다.

$$wm_{k,i} = nc_{k,i} \cdot u\left(\sum_{j=0}^{W-1} bm_{k,j} > 0\right) \quad (28)$$

이 식은 채널 ch_k 의 인접채널에서 진행중인 간섭이 있는 경우 ($nc_{k,i}=1$)에 채널 ch_k 에 대해 최근 W 개의 채널 평가결과를 이용하는 방식이다. (그림 11)의 결과를 얻었을 때 사용한 것과 동일한 데이터를 이용하고 식 (26), (27), (28)을 적용하여 IEEE 802.15.4 채널에 나타나는 WiFi 트래픽의 간섭에 대해 수정된 채널평가결과를 (그림 12)에 나타냈다.



(그림 12) 수정된 채널평가 ($wm_{k,i}$) 결과
(Figure 12) The result of modified channel evaluation ($wm_{k,i}$)

(그림 11)과 (그림 12)를 비교하면 약 390에서 610 스텝 사이에서 시험용 WiFi 트래픽이 발생하는 채널과 구간을 제외한 영역에서 간헐적으로 채널에 간섭이 발생한다고 판정되었던 경우들과 시험용 WiFi 트래픽이 집중적으로 발생되고 있는 구간에서 간헐적으로 채널에 간섭이 없다고 판정되었던 부분이 사라진 것을 볼 수 있다.

이 절에서 표현된 실험결과를 볼 때 WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 채널들에 간섭이 발생할 때 이를 피하여 새로운 채널을 탐색할 때, WiFi 한 채널의 스펙트럼이 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널에 동시에 나타나는 특성을 응용해 이 논문에서 제시된 IEEE 802.15.4의 인접 채널들에 대한 채널평가결과를 동시에 고려하여 탐색하는 방법으로 IEEE 802.15.4 채널에 나타나는 WiFi 트래픽의 간섭을 탐색할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 네트워크의 노드들이 IEEE 802.11 프로토콜을 사용하는 WiFi 네트워크의 노드들과 공간적으로 중첩되거나 서로 가까이 설치되고 두 네트워크의 노드들이 서로 겹치는 주파수 영역을 사용하도록 채널이 설정되어 있는 경우, WiFi에서 발생하는 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 노드들이 간섭을 받을 때 IEEE 802.15.4 노드들이 WiFi의 간섭을 피해서 새로운 채널로 옮겨가기 위해 하나의 IEEE 802.15.4 장치로 다수의 IEEE 802.15.4 채널들에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 진행하기 위한 방법과 WiFi 간섭이 발생하는 IEEE 802.15.4 채널을 탐색하는 방법에 대해서 서술하였다.

WiFi 트래픽이 IEEE 802.15.4 네트워크에 간섭을 일으키는 환경에서 간섭현상을 판정하기 위한 요소들과 방법에 대한 연구, 그리고 새로운 채널을 탐색하기 위한 방법으로서 WiFi 네트워크에서 비콘이 주기적으로 발생하므로 IEEE 802.15.4 채널에서 샘플된 RSSI값에 대한 신호처리를 통해 주기성을 찾는 방법과 WiFi 신호의 스펙트럼은 여러 개의 IEEE 802.15.4 채널에 해당하므로 다수의 IEEE 802.15.4 장치를 인접한 채널에 설정하고 채널에 대해 샘플된 RSSI가 동시에 비슷한 특성을 보이는지 확인하는 방법에 대해서 분석하였다. 이러한 기준에 연구된 방법들은 IEEE 802.15.4 채널들에 간섭을 일으키는 WiFi 트래픽을 인접한 채널들에서 동시에 탐지하기 위해 다수의 장치를 사용하거나 샘플된 신호의 처리를 위한 부하가 큰 문제가 있다.

한편, IEEE 802.15.4의 어떤 채널에 부하가 커질 때, IEEE 802.15.4의 노드 내에서 데이터가 발생한 순간부터 CSMA-CA 알고리즘을 적용시키면서 채널이 비어있다는 것을 확인할 때까지 걸리는 시간, 즉 매체접근지연시간이 증가하고 백오프지연이 자주 실패하는 특징이 있다. 따라서 이 논문에서는 매체접근지연시간과 백오프지연

과정 성공여부를 이용해 IEEE 802.15.4 채널에 나타나는 간섭을 판단하기 위해 IEEE 802.15.4의 CSMA-CA 알고리즘의 동작이 분석되었다. CC2530 칩은 IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는데, 사용하는 채널을 임의로 변경가능하고 CSMA-CA 알고리즘을 쉽게 구현할 수 있도록 하드웨어 난수발생기, 백오프지연과정에 사용되는 타이머, CCA 기능을 수행한 결과를 알 수 있는 레지스터를 갖고 있어서 백오프지연과정에서 발생하는 사건마다 처리해야 하는 CC2530 내에 중앙처리장치 코어 (core)의 처리부하가 적다. 그러므로 IEEE 802.15.4 장치로 다수의 채널에 대해 동시에 매체접근지연시간을 구하기 위해서 각 채널에서 CSMA-CA 알고리즘을 적용할 때 발생하는 사건들을 모아서 먼저 발생하는 사건들을 중앙처리장치 코어가 우선적으로 처리해나가면서 각 채널마다 CSMA-CA 알고리즘이 종료될 때까지 시간을 추적해나 가면, 가장 마지막에 발생하는 사건이 처리되는 순간 CSMA-CA 알고리즘을 진행하던 채널들 전체에 대한 매체접근지연시간을 모두 구한 상태가 되어 이후 채널에 대한 평가요소로 활용할 수 있게 된다. 이 논문에서는 이와 같은 생각에 대한 이해를 돕기 위해 하나의 IEEE 802.15.4 장치로 두 개의 IEEE 802.15.4 채널에 대해 병렬적으로 백오프지연과정을 진행하는 과정을 예를 들어서 설명한 후 다수의 채널로 확장할 수 있도록 병렬적인 백오프지연 알고리즘을 일반적으로 표현하였다.

그리고 이 논문에서 제안된 병렬적인 백오프지연과정에서 부가적으로 구해지는 매체접근지연시간의 특징을 실험적으로 확인하고 분석하기 위해 노트북컴퓨터와 AP로 구성된 WiFi 네트워크를 구성하고 IEEE 802.15.4 장치로 IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는 Texas Instrument사의 CC2530 칩을 포함하는 CC2530EM을 사용하여 CC2530 칩에 제안된 병렬적인 탐색 알고리즘을 구현하였다. 그리고 노트북컴퓨터에서 “Nuts About Nets, LLC”의 “netstress” 프로그램으로 시험용 WiFi 트래픽을 발생시켰다.

IEEE 802.15.4 장치의 CCA 기능에서 채널이 비어있다고 판정되는 기준치를 다양한 값으로 변경한 상태에서 WiFi 트래픽을 발생시키고 IEEE 802.15.4의 16개 채널에 대해 제안된 병렬적인 백오프지연기법으로 매체접근지연시간을 동시에 구했다. 측정된 결과를 보면 시험용 WiFi 트래픽이 발생하는 시간 동안 트래픽이 발생하는 WiFi 채널과 겹치는 부분의 IEEE 802.15.4 채널들에서 동일한 시간대에 매체접근지연시간이 크게 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 그리고 CCA 기능의 기준치가 낮아질

수록 IEEE 802.15.4 채널들에서 매체접근지연시간이 동시에 증가하는 서로 인접한 채널들 개수도 증가하는 현상이 관찰되었다.

다수의 IEEE 802.15.4 채널에 대해 병렬적으로 백오프 지연과정을 진행하는 방법을 이용하여 구한 각 채널에 대한 매체접근지연시간과 백오프지연성공여부에 관한 데이터를 기초로 각 채널에서 다른 트래픽에 의한 간섭이 진행중인지를 판정하기 위한 2진수형태의 결과값을 갖는 채널평가함수를 정의하였다. 채널평가함수는 계산에 사용되는 샘플 데이터의 개수, 백오프지연실패에 대한 가중치, 부하가 크다고 인정되는 매체접근지연시간에 대한 기준치 등과 같은 요소들을 적절히 조절할 수 있도록 고안되었다. 시험용 데이터에 대한 평가결과는 WiFi 트래픽이 집중적으로 발생되어 매체접근지연시간이 크거나 백오프지연실패의 빈도가 큰 구간과 채널들에서 간섭이 진행중이라고 평가되었다. 그러나 간헐적으로 시험용 WiFi 트래픽이 발생되지 않는 영역에서 간섭이 진행중이라고 판정하거나 시험용 트래픽이 발생중인 채널과 구간에서도 가끔 간섭이 없다고 판정하는 경우도 관찰되었다. 따라서 이러한 현상에 대해 WiFi 채널이 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널들과 주파수 스펙트럼이 겹치고, WiFi 트래픽이 발생하는 기간 동안 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널에서 동시에 매체접근지연시간과 백오프지연실패의 빈도가 증가하는 성질을 이용하여 어떤 채널에서 WiFi의 간섭이 진행중인지를 판정하기 위해 그 채널과 인접한 채널들의 채널평가결과를 함께 반영하도록 평가함수가 보완되었다. 인접한 채널들의 상태를 반영한 수정된 채널평가함수는 간헐적으로 정확하게 판단하지 못하는 경우가 개선되고 시험용 WiFi 트래픽이 발생하고 있는 동안에 해당 IEEE 802.15.4 채널들에서 간섭이 진행중으로 판정하는 결과를 보인다.

이 논문에서 제안된 방법을 더 발전시키기 위해서 다음과 같은 연구가 이루어져야 한다. WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 채널에 나타나서 부하로 작용하는 수준이 IEEE 802.15.4 프로토콜의 상위계층에 구현되는 응용의 관점에서 간섭으로 인정될지 여부는 상위계층에 구현되는 응용의 요구조건에 따라 다르다. 따라서 각 응용의 요구조건에 따라 IEEE 802.15.4 채널에 발생하는 간섭의 평가에 사용되는 요소들에 대해 설정되어야 하는 기준치를 응용별로 찾아내는 연구가 필요하다. 그리고 IEEE 802.15.4 프로토콜의 대부분의 응용이 802.15.4 프레임 송수신기능 하드웨어, 8051 코어 등과 같은 처리속도가 높지 않은 프로세서, 적은 용량의 메모리를 포함하는 하나

의 칩에 구현된다. 따라서 이와 같은 제한 조건에서 제안된 방법이 구현될 수 있도록 계산에 사용하기 위해 메모리에 유지되어야 하는 데이터의 양, 연산의 복잡도 등을 줄여나가는 것에 대한 연구가 필요하다. 또한 IEEE 802.15.4 노드들이 일반적으로 여러 개의 노드들이 네트워크를 형성하며 설치되므로 서로 다른 위치의 노드들에서 탐색된 결과가 노드들이 설치된 환경에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 주변 노드들의 탐색결과를 활용하여 통합적으로 판단하는 방법에 대한 연구도 필요하다.

참 고 문 헌(Reference)

- [1] M. S. Kang, J.W. Chong, H. Hyun, S.M. Kim, B.H. Jung, and D.K. Sung, "Adaptive Interference-Aware Multi-Channel Clustering Algorithm in a Zigbee Network in the Presence of WLAN Interference," Int. Symposium on Wireless Pervasive Computing 2007, pp. 200-205, Feb. 2007.
- [2] S. M. Kim, J. W. Cho, C. Y. Jung, T. H. Jeon, J. H. Park, Y. J. Kang, S. H. Jeong, M. J. Kim, and D. K. Sung, "Experiments on Interference and Coexistence between Zigbee and WLAN Devices Operating in the 2.4 GHz ISM Band", Proc. NGPC, pp. 15-19, Nov. 2005.
- [3] M. U. Memon, L. X. Zhang, and B. Shaikh, "Packet Loss Ratio Evaluation of the Impact of Interference on ZigBee Network caused by Wi-Fi (IEEE 802.11b/g) in E-health Environment", IEEE 14th International Conference on eHealth Networking, Applications and Service (Healthcom), pp. 462-465, 2012.
- [4] M. L. Song, "A Detection Method of Interference from WiFi Network in IEEE 802.15.4 Network", Journal of Korean Society for Internet Information, v. 14, no. 4, pp. 1-12, Aug. 2013.
- [5] R. Musaloiu-E and A. Terzis, "Minimising the Effect of WiFi Interference in 802.15.4 Wireless Sensor Networks", Int. Journal of Sensor Networks, vol. 3, no. 1, 2008.
- [6] K. Srinivasan and P. Levis, "RSSI is Under Appreciated", Proc. of the 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets), May 2006.
- [7] C. Won, J. H. Youn, H. Ali, H. Sharif, and J.

- Deogun, "Adaptive Radio Channel Allocation for Supporting Coexistence of 802.15.4 and 802.11b", Proc. VTC, vol. 4, pp. 2522-2526, Sep. 2005.
- [8] P. Yi, A. Iwayemi, and C. Zhou, "Developing ZigBee Deployment Guideline Under WiFi Interference for Smart Grid Applications", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 110-120, Mar. 2011.
- [9] Z. Jindong, S. Wu, C. Mu. B. Fan, and Y. Lu, "Study and Prediction of Wireless Link Quality for Adaptive Channel Hopping", Journal of Networks, vol. 7, no. 11, pp. 1884-1891, Nov. 2012.
- [10] C. A. Boano, T. Voigt, A. Dunkels, F. Osterland, N. Tsiftes, L. Mottola, and P. Suarez, "Exploring the LQI Variance for Rapid Channel Quality Assessment", Proc. of the 8th Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), pp. 369-370, Apr. 2009.
- [11] C. A. Boano, M. A. Zuniga, T. Voigt, A. Willig, and K. Romer, "The Triangle Metric : Fast Link Quality Estimation for Mobile Wireless Sensor Networks", Proc. of 19th Int. Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 1-7, Aug. 2010.
- [12] C. Gomez, A. Boix, and J. Paradells, "Impact of LQI-Based Routing Metrics on the Performance of a One-to-One Routing Portocol for IEEE 802.15.4 Multihop Networks", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, pp. 1-20, 2010.
- [13] G. Thonet, P. Allard-Jacquín, and P. Colle, "ZigBee-WiFi Coexistence", Schneider Electric White Paper and Test Report, pp. 1-38, Apr. 2008.
- [14] R. Xu, G. Shi, J. Luo, Z. Zhao, and Y. Shu, "MuZi : Multi-channel ZigBee Networks for Avoiding WiFi Interference", Proc. of 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), pp. 323-329, Oct. 2011.
- [15] J. Ansari, T. Ang, and P. Mähönen, "WiSpot : Fast and Reliable Detection of Wi-Fi Networks using IEEE 802.15.4 Radios", Proc. of MobiWac'11, pp. 35-44, Nov. 2011.
- [16] R. Zhou , Y. Xiong , G. Xing , and L. Sun, "ZiFi : Wireless LAN Discovery via ZigBee Interference Signatures", Proc. of MobiCom'10, pp.49-60, Sep. 2010.
- [17] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std 802.15.4-2006, Sep. 8, 2006.
- [18] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ANSI/IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007), Mar. 2012.

● 저자 소개 ●



송 명 렬

1985년 연세대학교 전자공학과 졸업(학사)

1988년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)

1996년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사)

1996년~현재 호서대학 정보통신공학과 교수

관심분야 : coexistence of wireless networks, wireless sensor networks, WLAN, embedded systems

E-mail : mlsong@hoseo.edu