

IEEE 802.15.4e 멀티 채널 QoS 스케줄링 알고리즘

Multi-channel QoS scheduling algorithm in IEEE 802.15.4e

우혁*, 김학규*, 이동준*, 강호용**

Hyuk Wu*, Hak-Kyu Kim*, Dong-Jun Lee* and Ho-Yong Kang**

요 약

IEEE 802.15.4는 TDMA(time division multiple access) 방식으로 동작하는 LWPAN(low-rate wireless personal area networks)의 표준이다. 그러나 IEEE 802.15.4는 QoS(quality of service), 확장성, 신뢰성 등에 제약이 있다. 기존 IEEE 802.15.4에서는 QoS 지원을 위하여 GTS(guaranteed time slot)을 사용한다. 그러나 GTS는 멀티 홉 환경에서 다수의 장치들의 QoS를 만족시키기엔 효과적인 방법이 아니며, 멀티 주파수 채널에 대한 고려도 없다. 이러한 제약 사항을 보완하기 위하여 IEEE 802.15.4의 MAC(media access control) 부계층을 강화한 표준으로써 IEEE 802.15.4e가 개발 중이다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4e에서 멀티 채널, 멀티 홉 환경의 종단 장치간 전송 지연을 만족시키기 위한 스케줄링 방식을 제안하고, 시뮬레이터를 이용하여 성능 평가를 수행하였다.

Abstract

IEEE 802.15.4 is a standard for LWPAN based on TDMA. IEEE 802.15.4 has not been used widely because of restrictions on the QoS, scalability, and reliability. IEEE 802.15.4 utilizes GTS for one-hop QoS transmission. However GTS is not an effective method to satisfy QoS in multi-hop environments. Currently IEEE 802.15.4e, an extended version of IEEE 802.15.4 MAC sub-layer, is being developed to satisfy more diverse performance requirements than IEEE 802.15.4. IEEE 802.15.4e provides multi-hop QoS transmission functionality and uses multiple frequency channels. In this paper, a multi-channel TDMA scheduling scheme is proposed to satisfy end-to-end transmission delay in IEEE 802.15.4e. The performance of the proposed scheme is evaluated using simulation.

Key words : DSME-GTS, IEEE 802.15.4e, LWPAN, Multiple channel, QoS, TDMA Scheduling.

I. 서 론

최근 공장 자동화, 의료 서비스, 스마트 그리드 등 다양한 산업 분야에서 저전력 무선 통신 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 IEEE 802.15.4[1] 표준이 제정되었다. IEEE

802.15.4 표준은 물리 계층과 MAC 부계층에 대한 표준이며, WSN(wireless sensor network)에 적용할 수 있는 기술이다. 이 표준을 기반으로 ZigBee[2], IEEE 802.15.5[16] 등이 네트워크 계층에서 동작하도록 개발되었다. 그러나 IEEE 802.15.4는 널리 사용되지 못하고 있다. 그 이유들은 다음과 같다. 먼저 QoS 지원

* 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(School of Electronics, Telecommunications and Computer Engineering, Korea Aerospace University)

** 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 제1저자 (First Author) : 우혁

· 투고일자 : 2011년 9월 23일

· 심사(수정)일자 : 2011년 9월 23일 (수정일자 : 2011년 10월 24일)

· 게재일자 : 2011년 10월 30일

을 위한 GTS가 팬 코디네이터(personal area network coordinator)에 직접 연결된 장치에게만 할당 가능하며 팬 코디네이터와 직접 연결되지 않은 2홉 이상의 장치는 GTS 할당과 이를 이용한 QoS 보장이 쉽지 않다. 또한 비콘 주기 동안 GTS가 7 슬롯으로 제한되어 최대 7장치에만 QoS 보장이 가능하다. 그리고 단일 무선 주파수를 사용함으로써, 이중 단말기 등에 의한 무선 간섭에 대처할 수 없다. 이러한 IEEE 802.15.4의 제약을 극복하고자 IEEE 802.15.4e가 연구 중이다.

IEEE 802.15.4e는 기본적으로 IEEE 802.15.4와 호환되도록 설계되었으며 위 문제를 개선하기 위하여 멀티슈퍼프레임 구조를 사용하여 GTS 슬롯 개수를 확장할 수 있도록 하였고 팬 코디네이터로부터 2홉 이상의 장치에게도 GTS 할당이 가능하도록 하였다. 그리고 무선 간섭에 대처하기 위하여 멀티 주파수 채널을 사용할 수 있도록 하였다. 이에 본 논문에서는 IEEE 802.15.4e의 새로운 특징인 멀티 채널, 멀티 홉 환경에서 종단 장치간 QoS 확보하며 전송 지연을 최소화하는 GTS 할당에 대한 스케줄링 알고리즘을 연구하고자 한다.

표 1. IEEE 802.15.4와 IEEE 802.15.4e 비교.
Table 1. Comparison of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.15.4e.

	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4e
주파수 대역	2.4GHz ISM	2.4GHz ISM
채널 수	싱글 채널	멀티 채널
프레임구조	슈퍼프레임	멀티슈퍼프레임
GTS 홉	싱글 홉	멀티 홉
GTS 슬롯 수	7 슬롯	7*2MO-SO 슬롯
GTS 스케줄링	FCFS	FCFS
채널 다이버시티	없음	채널 적응 모드 채널 호핑 모드

MO : Multisuperframe Order
SO : Superframe Order
FCFS : First Come First Service

WSN 에서의 스케줄링 방식에 대한 기존 연구 현황은 아래와 같다. 스케줄링 문제를 그래프 컬러링 문제로 정의 할 수 있다. 무선 장치를 버텍스(vertex)로 가정하고, 무선 장치 간의 연결 링크를 간선으로 하는 토폴로지 그래프로 표현할 수 있다[7]. 두 링크

가 인접하여 동시에 전송할 수 없는 상황을 충돌이라 하며 이는 충돌 그래프(conflict graph)로 표현할 수 있다. 모든 링크들 간에 충돌이 발생하지 않는 충돌 회피 스케줄링(conflict free scheduling) 연구들이 있다 [5-7]. 무선 장치 간의 간섭을 고려하여 일정 임계치 이상의 간섭 관계의 링크를 충돌로 간주하여 충돌 그래프를 구성한 연구도 있다[5]. 그 외에 멀티 홉을 고려한 스케줄링 연구[6,9,10,11], 멀티 채널을 고려한 스케줄링 연구[11], 최적화를 위한 계층 간 설계(cross-layer design)에 대한 연구도 있다[4,7,8,11,15]. 다수의 장치에게 GTS 슬롯을 시간에 따라 동적으로 할당하는 스케줄링 연구가 이루어졌다[12-14]. 기존 연구 중 [11]은 멀티 채널, 멀티 홉 네트워크에서 라우팅을 고려한 계층 간 설계의 최적화 문제를 정의하였다. 이 최적화 문제의 목적 함수는 스케줄링 된 각각 CTP(Concurrent Transmission Pattern)의 시간들의 합을 최소화 하는 것이다. 그러나 [11]은 종단 장치간 전송 지연을 최소화하는 것을 목적으로 하지 않는다.

[10]은 싱글 채널, 멀티 홉 네트워크에서의 계층 간 설계의 최적화 문제를 정의하였다. 이 최적화 문제의 목적 함수는 각 데이터 전송 경로에서의 종단 장치 간 최대 전송 지연을 최소화하는 min-max 문제이다. 그리고 전송 순서와 랭크(rank) 개념을 이용한 스케줄링 방안을 제시하였다. [10]은 본 논문에서의 종단 장치간 전송 지연을 최소화 하려는 목적과 일치하지만, 싱글 채널만 고려하고 멀티 채널을 고려치 않는 점에서 차이가 있다. 본 논문에서는 [10]을 기반으로 IEEE 802.15.4e의 특징인 멀티 채널을 고려한 종단 장치간 전송 지연 QoS를 만족시키고 라우팅을 고려한 계층 간 설계의 최적화 문제를 정의하고 이를 해결하는 스케줄링 방식을 제안하였다. 그리고 시뮬레이터를 이용하여 성능 평가를 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 IEEE 802.15.4e 을 비롯한 시스템 모델에 대하여 소개한다. III장에서는 멀티채널에서 충돌을 회피하고 QoS를 만족시키기 위한 스케줄링 방식을 제안하고, IV장에서는 시뮬레이션 결과를 보이고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

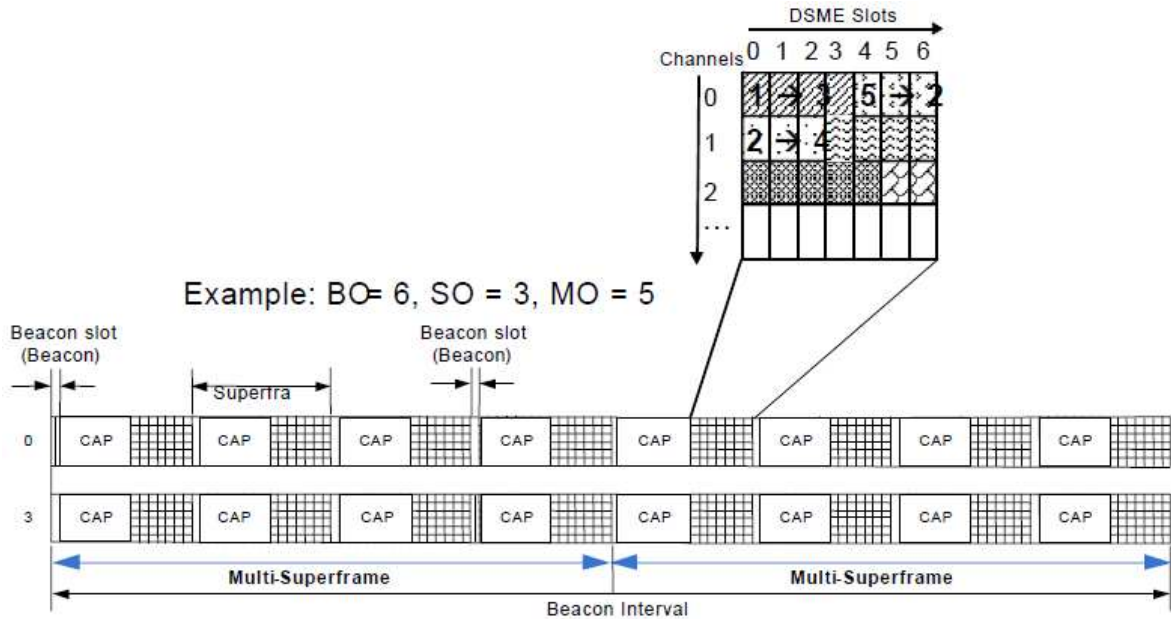


그림 1. 채널 적응 모드에서의 멀티슈퍼프레임 구조[3]
 Fig. 1. Multi-superframe structure in channel adaptation mode[3]

II. 시스템 모델

그림 1은 IEEE 802.15.4e MAC 부계층의 DSME-GTS(distributed synchronous multi-channel extension guaranteed time slot) 동작 방식의 멀티슈퍼프레임 구조를 나타낸다. 슈퍼프레임은 팬 코디네이터와 코디네이터가 주기적으로 전송하는 비콘, 경쟁 기반의 CSMA/CA 알고리즘을 이용하여 자원을 할당하는 CAP(Contention Access Period)과 GTS 할당이 가능한 CFP(Contention Free Period)로 구성되어 있다[1]. 멀티슈퍼프레임은 여러 개의 슈퍼프레임이 병합되어 있다. 한 비콘 주기에는 여러 개의 멀티슈퍼프레임이 존재하며, 첫 멀티슈퍼프레임의 GTS 스케줄링이 다른 멀티슈퍼프레임에도 동일하게 적용된다. 비콘과 CAP은 싱글 채널로 동작하고, CFP는 멀티 채널로 동작한다[3]. 그리고 DSME-GTS는 동종 혹은 이종 장치 간의 간섭에 대응하기 위하여 채널 적응 모드(channel adaptation mode)와 채널 호핑 모드(channel hopping mode)를 지원한다. 본 논문에서는 채널 적응 모드를 가정하였다.

네트워크를 형성하는 장치로는 하나의 팬 코디네이터와 다수의 종단 장치 그리고 팬 코디네이터와 종단 장치를 중계해 주기 위한 다수의 코디네이터가 있

다. 네트워크를 형성하기 위하여 우선 팬 코디네이터가 주기적으로 비콘(beacon)을 전송한다. 그 비콘을 수신한 코디네이터는 팬 코디네이터와 등록 과정을 통해 네트워크에 참여한다. 네트워크에 참여한 코디네이터도 주기적으로 비콘을 전송하며 다른 코디네이터와 종단 장치의 등록 요청을 받아들인다. 종단 장치는 팬 코디네이터 혹은 코디네이터로부터 수신한 비콘을 모아 어떤 코디네이터에 접속할 지를 판단한 후 등록 과정을 통해 네트워크에 참여한다. 위의 과정을 통해 팬 코디네이터를 루트(root) 노드로 하고, 종단 장치를 리프(leaf) 노드로 하고, 코디네이터는 팬 코디네이터와 종단 장치 사이에 위치하는 트리 형태의 네트워크가 형성된다. 본 논문에서는 네트워크 형태와 동일한 트리 라우팅을 가정한다[16]. 그리고 팬 코디네이터는 등록 과정 중 코디네이터 혹은 종단 장치로부터 정보를 받아 저장함으로써 모든 라우팅 경로에 대한 정보를 알 수 있다고 가정한다.

그림 2는 본 논문에서 고려하는 트리 구조 네트워크를 보여준다. 노드 1은 팬 코디네이터이다. 노드 2와 노드 3은 코디네이터로서 팬 코디네이터에 등록하여 네트워크에 참여한다. 노드 4, 5, 6, 7은 종단 장치이며, 노드 4, 5는 코디네이터 노드 2에 등록 한다. 노드 6, 7은 코디네이터 노드 3에 등록 한다. 만약 노

드 4가 노드 7에게 데이터를 전송할 경우, 데이터 전송 경로는 트리 라우팅 알고리즘에 의하여 노드 2, 노드 1, 노드 3 그리고 노드 7의 순서이다.

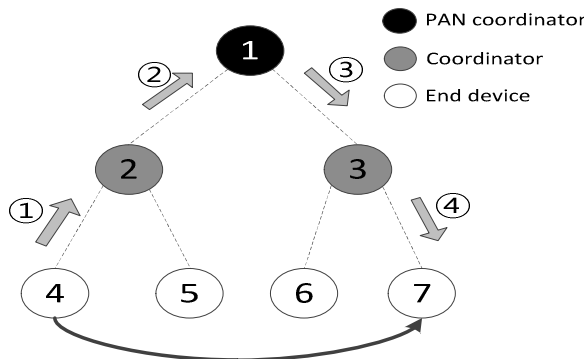


그림 2. 트리 구조 네트워크
Fig. 2. Tree-structured network

시스템을 모델링하기 위하여 그래프 컬러링 이론을 이용한다. 팬 코디네이터, 코디네이터, 종단 장치 간의 연결 링크 관계를 토폴로지 그래프 $G = \{V, E\}$ 로 나타낼 수 있다. V 는 벡터로서 노드를 의미한다. E 는 간선으로써 두 벡터들 사이의 연결 링크를 나타낸다. 여기서 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 는 n 개의 벡터의 집합이고, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 는 벡터와 벡터가 직접 연결된 링크인 m 개의 간선들의 집합이다. 그리고 동일한 채널을 사용하는 인접한 두 간선 간에는 한 간선이 전송 중일 때 다른 간선이 전송을 시도할 경우 전송 에러가 발생할 수 있다. 이 두 간선의 충돌 관계를 충돌 호(CA, conflict arc) 관계라 하고, 이 관계를 그래프 $C = \{E, CA\}$ 로 나타낸 것을 충돌 그래프라 한다[4-7]. 충돌 그래프에는 r 개의 충돌 호 관계가 존재한다. 그리고 동일한 채널을 사용하는 두 간선들은 서로 인접해 있지 않지만 간섭에 의한 전송 에러가 발생할 수 있다. 이 두 간선 간에 간섭이 임계치 이상으로 영향을 줄 경우 충돌 호 관계로 간주하여 충돌 그래프에 추가한다. 여기서 간섭 임계치를 어떻게 결정하느냐에 따라 충돌 호 관계의 수가 달라질 수 있다. 멀티 채널에서는 두 간선이 서로 다른 채널을 사용할 경우 충돌 호 관계가 성립하지 않는다. 그러나 한 간선은 동시에 송신, 수신 할 수 없다. 또한 한 간선은 동시에 2곳 이상으로 송신 할 수 없고, 서로 다른 2곳 이상의 간선으로부터 수신 할 수 없다. 위와 같이 2가지 이상의 작업을 동시

에 할 수 없는 간선 간의 관계를 형제 관계라 부르기로 한다.

III. 제안하는 스케줄링 방식

3-1. 문제 정의

멀티 홉 종단 장치간 QoS 보장을 위해서는 거쳐가는 모든 중간 노드들에서 데이터 전송 충돌이 없이 데이터 전송이 가능해야 하며, 전송율과 전송 지연 시간에 대한 제약조건을 만족해야 한다. IEEE 802.15.4e에서는 팬 코디네이터를 포함한 모든 장치에서 1홉 거리의 각 장치간에 분산적으로 GTS 할당이 이루어지도록 하였다. 이로써 모든 장치에 GTS 할당이 가능하게 되었지만, 멀티홉 종단 장치간 GTS 할당 방법에 대해서는 기술되어 있지 않다.

본 논문에서 제안하는 멀티 홉 종단 장치간 QoS를 만족시키기 위하여 GTS를 할당하는 방법에 대한 스케줄링 알고리즘의 동작은 다음과 같다. 전체 네트워크의 자원관리를 팬 코디네이터가 담당 하도록 하고 각 장치는 QoS가 보장되는 멀티 홉 데이터 전송 시에 팬 코디네이터에게 QoS 확보를 요청한다. 팬 코디네이터는 이 요청을 기반으로 각 장치의 GTS 할당을 스케줄링하고, 이 요청에 대한 스케줄링 결과를 비콘에 포함하여 네트워크의 모든 장치에게 전파함으로써 멀티 홉 종단 경로상에 있는 모든 장치들에게 GTS가 할당 되도록 한다. GTS는 CFP에서만 할당되므로 간략화를 위하여 비콘과 CAP 구간은 스케줄링 대상에서 제외한다. 종단 장치간 전송 지연 계산 시 CFP 구간의 전송 지연만 고려한다. 비콘, CAP, CFP 구간의 크기는 고정이므로 실제 전송 지연 시간 값으로 변환할 수 있다. 그리고 데이터 전송 경로가 중복으로 존재할 경우, 서로 다른 여러 시점에 각각의 슬롯을 할당 하는 것이 아니라, 여러 슬롯을 모아 한 시점에 할당한다고 가정한다.

멀티 홉, 멀티 채널, 충돌 회피, QoS 스케줄링을 위해서 스케줄러는 네트워크 계층의 멀티 홉 데이터 전송에 관련된 전송 경로와 각 경로에서 요구하는 데이터 전송율(required data rate)을 알아야 한다. MAC 부

계층에서는 스케줄링을 위한 GTS 슬롯 관리 기능이 있어야 하고 물리 계층에서는 간섭을 고려하기 위해서 장치 간 전송 손실(pathloss) 정보를 알아야 한다. 계층 간 설계를 통하여 네트워크 계층, MAC 부계층, 물리 계층의 정보를 파악할 수 있다.

네트워크에서 멀티 홉으로 데이터를 전송하고자 하는 다수의 쌍이 존재할 경우, 이 모든 쌍의 QoS를 만족시켜야 한다. 이를 위하여 우선 멀티 홉 데이터 전송 시 경로에 속하는 모든 링크에 GTS를 순차적으로 할당해야 한다. 그림 3(b)와 같이 데이터 경로 상에서 GTS가 순차적으로 할당되지 않을 경우, 데이터 전송을 위해 다음 멀티슈퍼프레임의 GTS 슬롯까지 대기해야 하며 이로 인해 전송 지연이 발생한다. 그리고 모든 링크 간에 충돌이 발생되지 않도록 스케줄링을 해야 한다. 만약 충돌이 발생하게 되면 요구 전송율을 만족시키지 못하게 되며, 재전송으로 인한 전송 지연이 발생한다. 충돌 호 관계의 링크 간에 서로 다른 채널을 사용한다면, 동일 슬롯에서 전송 가능하다. 서로 채널이 다를 경우에는 충돌이 발생하지 않기 때문이다. 그러나 서로 다른 채널을 사용하더라도 형제 관계일 경우에는 동일 슬롯을 사용할 수 없다. 그리고 모든 데이터 전송에서 종단 장치간 전송 지연이 QoS를 만족시켜야 하며 GTS 슬롯 할당은 멀티슈퍼프레임의 GTS 슬롯 개수를 초과할 수 없다. 위 사항들을 고려하여 다음과 같은 최적화 문제를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \min_{\pi, \mathbf{ch}, \mathbf{o}, t} t \\
 & \text{s.t. } D_{(l)} \leq t, \quad l \in R \\
 & \quad \mathbf{v} \leq \mathbf{C}^T \boldsymbol{\pi}_{CH(i)} \quad \mathbf{o}N \leq N\mathbf{1} \quad \mathbf{u}, \quad "i \in CH \\
 & \quad \mathbf{v} \leq \mathbf{S}^T \boldsymbol{\pi} \quad \mathbf{o}N \leq N\mathbf{1} \quad \mathbf{u}, \\
 & \quad \boldsymbol{\pi}_{CH(i)} \in \{0,1\}^r, \quad t \geq 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

(1)은 [10]의 싱글 채널 최적화 문제를 멀티 채널을 고려한 최적화 문제로 확장하여 재정의 하였다. $\mathbf{ch} = [ch_1, ch_2, \dots, ch_m]^T$ 은 멀티 채널을 고려하기 위하여 추가하였으며, m개의 링크에 할당되는 채널을 나타내는 벡터이다. $\boldsymbol{\pi} = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m]^T$ 는

m개의 링크에 할당된 GTS의 시작 슬롯 위치를 나타내는 벡터이다. $\mathbf{o} = [\dots, o_{ij}, \dots]^T$ 는 충돌 호 관계인 링크 i와 링크 j간의 전송 우선순위로 0 혹은 1의 값을 가지는 r개의 벡터이다. o_{ij} 가 0일 경우 링크 i가 먼저 전송하고, 1일 경우에는 링크 j가 먼저 전송한다. t는 모든 데이터 전송 경로의 종단 장치간 최대 전송 지연 시간이다. 목적 함수는 모든 링크에 대해서 $\boldsymbol{\pi}, \mathbf{ch}, \mathbf{o}, t$ 가 주어졌을 때, 각 데이터 전송 경로의 종단 장치간 전송 지연의 최대값을 모든 데이터 전송 경로에 대해서 최소화하기 위한 min-max 문제이다. 이 목적 함수에 대해 다음과 같은 제약 조건이 있다.

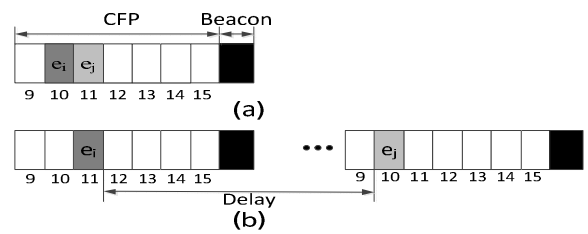


그림 3. o_{ij} 는 0일 때 충돌 링크 e_i 와 e_j 에 대한 딜레이
Fig. 3. Delay for conflict links e_i and e_j when o_{ij} is 0

특정 데이터 전송 경로 l의 종단 장치간 전송 지연 $D_{(l)}$ 은 요구되는 최대 전송 지연 시간 t보다 작아야 한다. 그리고 모든 전송 경로 R 벡터에 대해서 종단 장치간 전송 지연이 t보다 작아야 한다. 그리고 각 채널에 할당된 모든 GTS 슬롯 $\boldsymbol{\pi}_{CH(i)}$ 에 대해 충돌이 없어야 하고 모든 채널에 대해서 이를 만족해야 한다. 여기서 N은 멀티슈퍼프레임에서 할당 가능한 총 GTS 슬롯의 수이다. $\mathbf{1}$ 은 m개의 열이 1의 값을 갖는 벡터이다. $\mathbf{v} = [\dots, v_{ij}, \dots]^T$ 는 충돌 호 관계의 두 링크 i와 링크 j 중에서 먼저 전송하는 링크가 요구하는 슬롯 개수를 나타내는 벡터이다. $\mathbf{u} = [\dots, u_{ij}, \dots]^T$ 는 충돌 호 관계의 두 링크 i와 링크 j 중에서 나중에 전송하는 링크가 요구하는 슬롯 개수를 나타내는 벡터이다. 각 링크에서 요구하는 슬롯의 개수는 모든 데이터 전송 경로에서 특정 링크를 거쳐 가는 각 연결 링크의 요구 슬롯 수를 합하여 구할 수 있다. C는 $m \times r$ 크기의 링크 간의 충돌 관계를 나타내는 접속 행렬(incidence matrix)이다. 여기

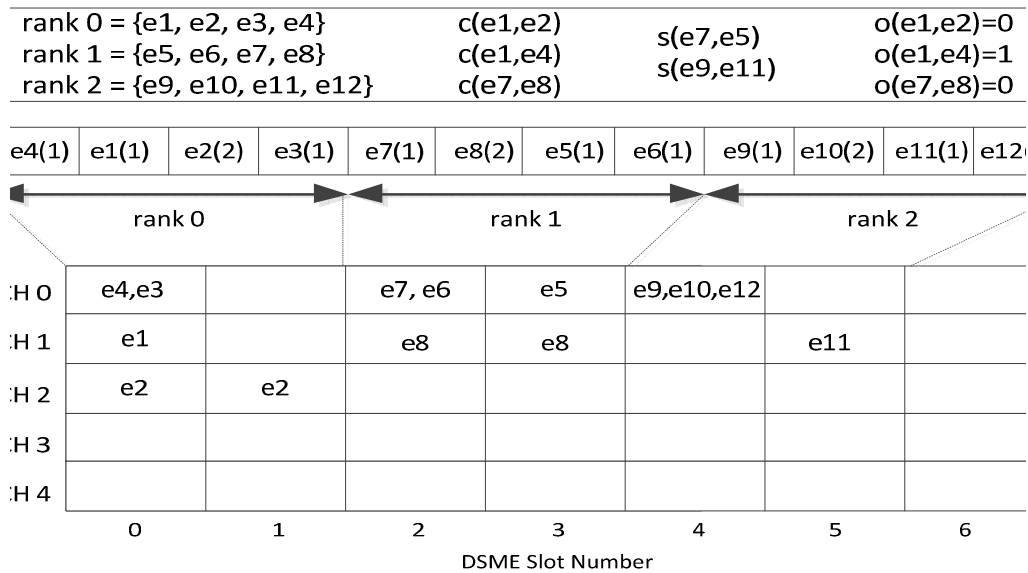


그림 4. 제안한 슬롯과 채널의 할당 방안
 Fig. 4. The proposed method for allocation of slots and channels

서 행은 링크이고 열은 충돌 호 관계로 특정 링크에서 모든 링크들에 대한 충돌 관계를 나타낸다. 접속 행렬 값이 0일 경우, 두 링크 간에 충돌 호 관계가 없음을 나타내고, 1일 경우 순방향 충돌 호 관계를 나타내고, -1일 경우 역방향 충돌 호 관계를 나타낸다 [10]. 순방향은 링크 i가 링크 j 보다 전송 우선순위가 높고, 역방향은 링크 j가 링크 i보다 전송 우선순위가 높다. 할당된 모든 GTS 슬롯 π 에 대해서 형제 관계가 없어야 한다. S 는 $m \times r$ 크기의 형제 관계를 나타내는 접속 행렬이다. 여기서 행은 링크이고 열은 형제 관계이다. C 와 마찬가지로 형제 관계가 없을 경우 0, 순방향 형제 관계의 경우 1, 역방향 형제 관계의 경우 -1의 값을 갖는다. (1)은 정수 프로그램 방법(integer programming method)을 적용하여 풀 수 있지만 이 경우에 유효한 시간 내에 문제를 풀기에 적합하지 않다. 그래서 본 논문에서 최적화 문제를 만족시키고, 유효한 시간 안에 스케줄링이 가능한 다음과 같은 방법을 제안한다.

3-2. 제안하는 스케줄링 방식

충돌 회피 스케줄링을 위해서는 충돌 관계에 있는 링크 간의 충돌이 발생하지 않도록 링크 간의 전송 순서를 결정해야 한다. 이를 위하여 각 데이터 전송

경로에서 링크의 전송 순서를 랭크로 나타낸다[10]. 랭크는 데이터 전송 경로 상에 있는 모든 링크의 전송 순서이다. 각 전송 경로의 처음 시작 링크에 랭크 값으로 0을 설정하고, 그 이후 전송 경로의 링크들에게는 순차적으로 1씩 증가 시킨 값을 랭크 값으로 설정한다. 만약 한 링크가 여러 전송 경로에 속하게 될 경우에는 가장 높은 랭크 값을 적용한다. 어떠한 데이터 전송 경로에 속하지 않는 링크는 0으로 설정한다. 모든 링크에 대해서 랭크 값을 설정하였다면, 충돌 호 관계에 있는 두 링크 i, 링크 j간에 전송 순서를 설정하도록 한다[10]. 만약 링크 i의 랭크 값이 링크 j보다 작다면 $o_{ij} = 0$ 으로 설정하고, 링크 j의 랭크 값이 더 작다면 $o_{ij} = 1$ 로 설정한다. 여기까지는 [10]과 동일하다. 그러나 본 논문에서는 IEEE 802.15.4e에 새로 추가된 특징인 멀티 채널을 고려하기 위하여 형제 관계를 추가하였고, 다음과 같은 스케줄링 방법을 제안한다.

우선 모든 데이터 전송 경로에 대하여 각 링크에서 요구하는 슬롯 수를 계산한다. 만약 요구하는 슬롯이 없는 링크는 스케줄링 대상에서 제외한다. 랭크가 동일한 링크들을 간에 전송 순서를 정하도록 한다. 동일한 랭크의 링크들 간에 충돌이 발생하는 링크들을 우선 배치하고(rank 0에서 e1, e2, e4), 충돌이 발생하는 링크들은 그 이후에 배치한다(rank 0에서

e3). 충돌 호 관계의 링크 간에는 전송 우선순위를 고려하여 우선순위가 높은 링크를 먼저 위치시킨다. 충돌이 없는 링크는 링크 번호가 낮은 순서로 배치한다. 각 랭크 값에 대해서 링크 간의 우선순위가 결정되었다. 이제 각 랭크의 링크들을 랭크 값이 낮은 링크부터 그림 4와 같이 1열로 위치시킨다. 그림에서 괄호로 안의 숫자는 각 링크가 요구하는 슬롯 수이다. e4(1)은 링크 4가 1개의 슬롯을 요구하는 것을 의미한다. 순차적으로 나열된 각 링크들을 그 순서에 대로 스케줄링 한다. 동일 랭크의 슬롯 시작 위치부터 이미 할당된 링크와 형제 관계가 없는 가장 앞선 슬롯에 할당한다.

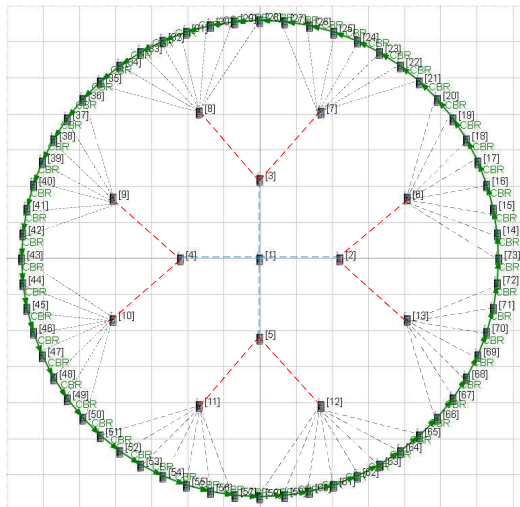


그림 5. 시뮬레이션 토폴로지
Fig. 5. Simulation Topology

만약 멀티 주파수 채널을 사용하고 슬롯의 여유가 있다면 전파 간섭을 최소화하기 위하여 이미 할당된 링크와 다른 주파수 채널을 사용하고, 슬롯의 여유가 없을 경우 이미 할당된 링크와 동일 슬롯의 동일 주파수 채널에 할당한다. 형제 관계의 링크가 이미 할당되어 있을 경우에는 형제 관계의 링크가 사용한 최종 슬롯의 다음 슬롯에 배치한다. 형제 관계는 없지만 충돌 관계의 링크가 이미 할당되어 있을 경우에는 동일 슬롯의 다른 채널에 할당한다. 이전 랭크의 모든 링크의 배치가 끝났다면, 다음 랭크의 링크들을 동일한 방법으로 배치한다. 단, 새로운 랭크의 시작 슬롯의 위치는 이전 랭크 링크들에게 할당된 슬롯 중 가장 높은 슬롯 번호의 다음 슬롯이 된다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터.
Table 2. Simulation Parameters.

파라미터	값
Number of channels	5
Channel frequency	2.4 GHz
Pathloss model	Two Ray
Shadowing model	Constant
Shadowing mean	4.0 dB
Fading model	None
Transmission Power	3.0 dBm
Modulation scheme	O-QPSK
CCA mode	Carrier sense
Antenna gain	0.0 dB
Temperature	290.0 K
Noise factor	10.0 dB
Beacon order	7
Multisuperframe order	6
Superframe order	3
CFP slot	7
DSME slot	56
CBR transmission node	60
CBR required slot	144
CBR transmission interval	1 sec
CBR packet size	126 Bytes
CBR Throughput	1008 bps

IV. 시뮬레이션 결과

4-1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이터는 Qualnet 5.0.2를 사용하였으며 주요 시뮬레이션 파라미터들은 표 2와 같다. 트래픽 생성을 위하여 응용 계층에 CBR(constant bit rate) 어플리케이션을 사용하였고 전송 계층은 UDP를 사용하였다. 네트워크 계층은 IP 기반의 트리 라우팅을 개발하여 사용하였다. MAC 부계층은 IEEE 802.15.4를 기반으로 IEEE 802.15.4e의 DSME-GTS와 멀티슈퍼프레임 구조를 추가 개발하여 사용하였다. 물리계층 또한 IEEE 802.15.4를 기반으로 멀티 채널 동작을 위하여 다수의 채널에서 동작하도록 구조를 변경하여 사용하였다. 그리고 네트워크 계층, MAC 부계층, 물리계층의 정보를 스케줄러가 모두 알 수 있도록 하였다.

그림 5는 시뮬레이션 토폴로지이며, 그림과 같이 CBR을 배치한 것은 팬 코디네이터에서 GTS 슬롯 수 부족으로 인한 병목 현상을 방지하기 위함이다. 병목 현상이 발생하면 QoS 스케줄링이 불가능하게 된다. 팬 코디네이터는 네트워크 내에 1개만 존재하며 토폴로지의 중심에 위치시킨다. 그리고 팬 코디네이터에서 1홉 거리에는 4개의 코디네이터가 연결되며 각각의 코디네이터는 2개의 자식 코디네이터와 연결되어 총 8개의 자식 코디네이터가 존재한다. 각각의 자식 코디네이터는 7 혹은 8개의 종단 장치와 연결된다. 종단 장치는 총 60개이며, 데이터 전송 목적지로 자신의 바로 옆에 있는 또 다른 종단 장치를 목적지로 선정 하였다. 전송하는 종단 장치와 수신 받는 종단 장치가 바로 옆에 위치하더라도 트리 라우팅의 경로상 코디네이터를 거쳐 2홉으로 전송된다. 송신 종단 장치와 수신 종단 장치가 서로 다른 코디네이터에 위치하게 될 경우는 코디네이터 상위의 또 다른 코디네이터 혹은 팬 코디네이터를 거쳐 최소 4홉으로 전송한다. CBR을 송신하는 장치는 총 60개이며, CBR required slot은 모든 CBR 데이터 전송에서 각 경로의 링크들에 할당되는 slot의 총 합이다.

DSME-GTS에서 각 장치는 이웃 장치를 찾기 위하여 전파(broadcast) 하는 명령어가 있다. 이 명령어를 수신한 장치는 수신 신호의 강도와 수신한 정보 중에서 송신 장치의 송신 신호 강도를 이용하여 송신 장치와의 전송 손실을 파악할 수 있다. 각 장치는 팬 코디네이터에게 등록 과정 또는 GTS를 할당 요청 시 주변 장치와의 전송 손실 정보를 함께 전달함으로써 팬 코디네이터가 스케줄링 시에 장치 간 전송 손실을 고려할 수 있다.

4-2. 시뮬레이션 결과

그림 6은 채널 개수 별 패킷 에러율(PER, packet error rate) 결과이다. 채널 수가 증가함에 따라 패킷 에러율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 채널 수가 1에서 2로 증가할 경우, 패킷 에러율이 급격하게 하락한다. 이는 채널수가 증가함에 따라 동일한 채널을 사용하는 링크의 수가 감소함으로 인해 간섭이 줄어들기 때문이다. 채널 수가 3에서 4, 5로 증가하는 경우

에는 채널 수가 3인 경우 이미 링크들 간에 간섭이 미비한 상황에서 채널 수를 4, 5로 증가시켜도 그로 인해 감소하는 간섭의 양이 적기 때문에 패킷 에러율에 큰 영향을 주지 않는다.

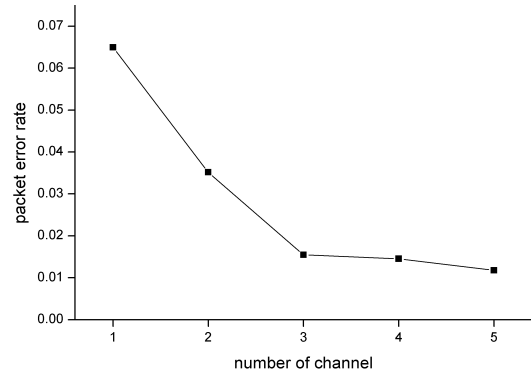


그림 6. 채널 수에 따른 패킷 에러율

Fig. 6. Packet error rate with respect to the number of channel

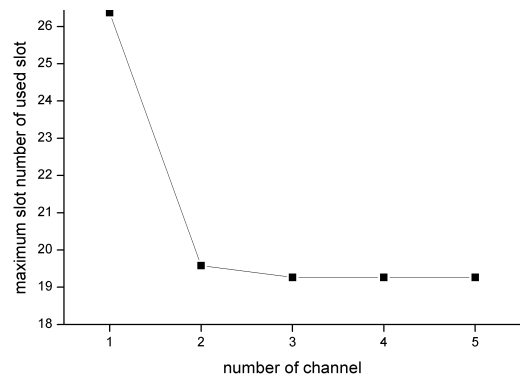


그림 7. 채널 수에 따른 사용된 최대 슬롯 번호

Fig. 7. Maximum number of used slots with respect to the number of channel

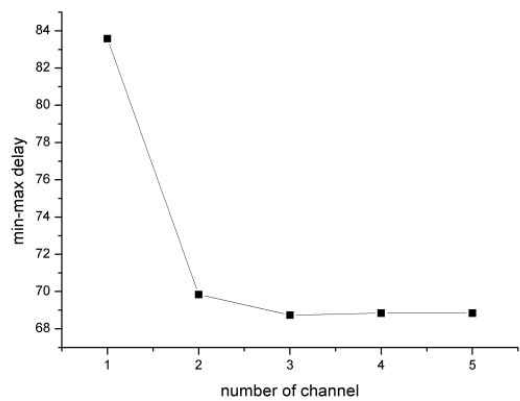


그림 8. 채널 수에 따른 min-max delay

Fig. 8. Min-max delay with respect to the number of channel

그림 7은 채널 수에 따른 하나의 멀티슈퍼프레임 주기에서 사용된 최대 슬롯 번호를 나타내며 최대 슬롯 번호가 작을수록 사용되지 않은 여유 슬롯이 많음을 나타낸다. 채널 수가 1에서 2로 증가할 경우, 동일 시간에 서로 다른 채널을 사용하는 링크가 증가함에 따라 사용된 최대 슬롯 번호는 감소한다. 그러나 채널 수가 3이상의 경우, 링크들 간의 형제 관계로 인한 제약으로 인해 멀티 채널의 활용도가 줄어들어 사용된 최대 슬롯 번호에 큰 변화가 없다.

그림 8은 채널 수에 따른 min-max delay를 나타낸다. 채널 수가 증가할수록 min-max delay는 감소함을 보여준다. 채널 수가 1에서 2로 증가할 경우, min-max delay는 크게 감소하며, 채널 수가 3이상의 경우에는 링크들 간의 형제 관계로 인한 제약으로 인해 멀티 채널의 활용도가 줄어들어 min-max delay에 큰 변화가 없다.

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4e의 새로운 특징인 멀티 홉, 멀티 채널 환경에서 종단 장치간 전송 지연 제약조건과 전송 에러율 조건을 만족하는 TDMA QoS 스케줄링 문제를 종단 장치간 min-max delay 최적화 문제로 정의하였다. IEEE 802.15.4e에서 종단 장치간 QoS확보에 대한 방법은 아직 자세히 기술된 바 없었다. 이 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 특정 장치가 GTS 할당을 하고자 할 경우, 우선 팬 코디네이터에게 요청을 하고, 팬 코디네이터는 모든 장치들의 이러한 GTS 요청을 모아 스케줄링하여 비콘을 통하여 네트워크의 모든 장치에게 전파하여 GTS 할당이 이뤄지는 방법을 제안하였다. 이로써 모든 종단 장치간에 QoS를 확보할 수 있게 되었으며, 전송지연을 최소화하는 데이터 전송이 가능하게 되었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로

수행하였음. [10035380, 초절전 센서네트워크 핵심기술개발]

참 고 문 헌

- [1] IEEE Standard 802.15.4-2006, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [2] <http://www.zigbee.org/>
- [3] IEEE Draft 802.15.4e, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Amendment 5: Amendment to the MAC sub-layer, 2010.
- [4] X. Lin, N. B. Shroff, and R. Srikant, "A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 8, pp. 1452-1463, Aug. 2006.
- [5] S. Ramanathan, "A unified framework and algorithm for channel assignment in wireless networks", *Wireless Networks*, vol. 5, no. 2, pp. 81-94, 1999.
- [6] S. Ramanathan, E. L. Lloyd, "Scheduling algorithms for multihop radio networks", *IEEE/ACM Tr. on Networking*, vol. 1, no. 2, pp. 166-177, Apr. 1993.
- [7] B. Hajek, and G. Sasaki, "Link Scheduling in Polynomial Time", *IEEE Tr. on Information Theory*, vol. 34, no. 5, pp. 910-917, Sep. 1988.
- [8] S. Gandham, M. Dawande, and R. Prakash, "Link scheduling in wireless sensor networks - Distributed edge-coloring revisited", in *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 4, pp. 2492-2501, 2005.
- [9] M. Sanchez, J. Zander, and T. Giles, "Combined routing & scheduling for spatial tdma in multihop ad hoc networks" in *Proc. WPMC*, vol. 2, pp. 781-785, 2003.
- [10] P. Djukic, and S. Valaee, "Delay Aware Link Scheduling for Multi-Hop TDMA Wireless Networks",

IEEE/ACM Tr. on Networking, vol.17, no3, pp. 870-883, Jun. 2009.

- [11] J. Zhang, H. Wu, Q. Zhang, and B. Li, "Joint routing and scheduling in multi-radio multi-channel multi-hop wireless networks", in *Proc. BroadNets*, vol. 1, pp. 631-640, 2005.
- [12] Y. K. Huang, A. C. Pang, and H. N. Hung, "An Adaptive GTS Allocation Scheme for IEEE 802.15.4", *IEEE Tr. on Parallel Distributed Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 641-651, 2008.
- [13] C. Na, Y. Yang, and A. Mishra, "An optimal GTS scheduling algorithm for time-sensitive transactions in IEEE 802.15. 4 networks", *Computer Networks*, vol. 52, pp. 2543-2557, 2008.
- [14] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "GTS allocation analysis in IEEE 802.15. 4 for real-time wireless sensor networks", in *Proc. IEEE IPDPS*, pp. 25-29, 2006.
- [15] J. Mistic, S. Shafi, and V. B. Mistic, "Cross-layer activity management in an 802-15.4 sensor network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 1, pp. 131-136, 2006.
- [16] IEEE Standard 802.15.5, IEEE Recommended Practice for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 15.5: Mesh Topology Capability in Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2009.

우혁 (禹赫)



2007년 2월 : 한국항공대학교 정보통신공학과(공학사)
 2009년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과(공학석사)
 2009년 9월~현재 : 한국항공대학교 정보통신공학과 박사과정
 2011년 9월~현재 : (주)인텔리코드 개발팀 과장
 관심분야 : P2P, Sensor network, Cognitive Radio

김학규 (金學奎)



2010년 2월 : 한국항공대학교 정보통신공학과(공학사)
 2010년 3월~현재: 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정
 관심분야 : Sensor network, Cognitive Radio

이동준 (李東俊)



1994년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학사)
 1996년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
 2000년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)
 2000년 9월~2005년 2월 : 삼성전자 책임연구원
 2005년 3월~현재 : 한국항공대학교 부교수
 관심분야 : P2P, 무선자원 관리, 무선인지통신시스템

강호용 (姜鎬龍)



1989년 부산대학교 전자공학과 학사
 2003년 충남대학교 정보통신공학과 석사
 1988년 12월~1993년 12월 대우통신 반도체연구소
 1994년 1월~2000년 5월 대우전자 ASIC센터
 2000년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원
 관심분야 : USN MAC/PHY, VLSI설계, 광가입자망 MAC/PHY