

논문 2011-48CI-4-5

IEEE802.15.4 기반 대규모 멀티 홉 무선센서네트워크를 위한 하이브리드 링크 품질 평가 방법

(A Hybrid Link Quality Assessment for IEEE802.15.4 based
Large-scale Multi-hop Wireless Sensor Networks)

이 상 신*, 김 중 환**, 김 상 철***

(Sang-Shin Lee, Joong-Hwan Kim, and Sang-Cheol Kim)

요 약

대규모 무선센서네트워크 시스템을 안정적으로 운영하기 위해서는 네트워크를 구성하는 각 링크의 링크 품질(link quality)을 기반으로 네트워크를 구성하는 것이 필요하다. 두 노드 사이의 링크 품질은 해당 링크를 포함하는 모든 경로의 품질에 영향을 준다. 따라서 데이터 전송을 위한 경로 수립 과정에서 링크의 품질을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 대규모 무선센서네트워크를 구성하고, 운영에 들어가기까지 필요한 시간 및 에너지를 최소화하기 위하여 통신 칩에서 제공하는 LQI(Link Quality Indication)와 RSSI(Received Signal Strength Indication)를 동시에 활용하여 각 링크의 링크 품질을 평가할 수 있는 HLQM(Hybrid Link Quality Metric)을 제안한다. HLQM을 사용하여 링크 품질을 평가하면, 다수의 패킷 전송과정을 거친 후 얻어진 결과를 링크 품질 평가에 다시 이용하는 기존의 방법들이 가지는 네트워크를 구성하고 운영에 들어가기까지 많은 set-up time과 비용이 소요되는 문제점과 LQI 또는 RSSI를 각각 사용하는 방법들이 가지는 문제점도 개선되어 보다 효율적으로 링크 품질을 평가할 수 있게 된다. 제안된 방법의 타당성과 효율성을 검증하기 위하여 실제 다수의 메시지 전송에서 얻어진 PDR과 비교하는 실험을 수행하였다. 실험의 결과에서 HLQM을 사용하면 다른 메트릭을 사용하여 얻어진 결과에 비해 정확도, 재현율 및 일치율이 상대적으로 우수하다는 것을 확인하였다.

Abstract

Link quality assessment is a crucial part of sensor network formation to stably operate large-scale wireless sensor networks (WSNs). A stability of path consisting of several nodes strongly depends on all link quality between pair of consecutive nodes. Thus it is very important to assess the link quality on the stage of building a routing path. In this paper, we present a link quality assessment method, Hybrid Link Quality Metric (HLQM), which uses both of LQI and RSSI from RF chip of sensor nodes to minimize set-up time and energy consumption for network formation. The HLQM not only reduces the time and energy consumption, but also provides complementary cooperation of LQI and RSSI. In order to evaluate the validity and efficiency of the proposed method, we measure PDR (Packet Delivery Rate) by exchanging multiple messages and then, compare PDR to the result of HLQM for evaluation. From the research being carried out, we can conclude that the HLQM performs better than either LQI- or RSSI-based metric in terms of recall, precision, and matching on link quality.

Keywords : Link Quality, LQI, RSSI, Multi-hop, WSN

* 정회원, 전자부품연구원, 한국외국어대학교
(U-Embedded Convergence Research Center,
KETI, Hankuk University of Foreign Studies)

** 정회원, *** 정회원-교신저자, 한국외국어대학교
(Hankuk University of Foreign Studies)

※ 이 연구는 2010학년도 한국외국어대학교 교내 학술
연구비 지원에 의한 것임.

접수일자: 2011년4월14일, 수정완료일: 2011년7월5일

I. 서 론

무선센서네트워크의 기술이 비약적으로 발전함에 따라 전장감시, 환경모니터링, 산업플랜트 모니터링 등과 같이 대규모 무선센서네트워크를 필요로 하는 응용 분

야로 영역이 확대되고 있다. 무선센서네트워크는 전원 공급이 제한되고 낮은 통신능력을 가지기 때문에 대규모 시스템을 구성하고 운영할 때 전원공급 및 통신능력의 수준을 가장 중요하게 고려해야 한다. 특히 네트워크를 구성하고 발생된 데이터를 전송하는 네트워크 프로토콜을 결정할 때에는 유지비용과 성능 사이에 항상 trade-off 관계가 발생하게 된다.

IEEE 802.15.4는 현재까지 무선센서네트워크에서 대부분 사용하는 통신 규약으로 물리계층과 MAC (Medium Access Control) 부계층(sub-layer)을 정의한다^[1]. 이 규약은 낮은 가격의 디바이스를 이용하여 저전력과 낮은 데이터 전송률의 특성을 가지는 무선센서네트워크를 운영할 수 있게 고안되어 있다. 또한 이 규약은 네트워크 계층 이상을 정의하지 않기 때문에 ZigBee와 같은 상용 프로토콜들에서는 IEEE802.15.4를 하부 구조로 사용하고 네트워크 계층 이상을 별도의 프로토콜을 정의하여 사용하고 있다^[2].

대규모 무선센서네트워크 시스템을 안정적으로 운영하기 위해서는 네트워크를 구성하는 각 링크의 링크 품질(link quality)을 기반으로 네트워크를 구성하는 것이 필요하다. 두 노드사이의 링크 품질은 해당 링크를 포함하는 모든 경로의 품질에 영향을 주기 때문에 데이터 전송을 위한 경로 수립 과정에서 링크의 품질을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 센서노드의 배치, 안테나의 방향, 주변의 장애물, 다른 무선기기의 간섭 및 온도와 같은 환경요인 등이 링크의 품질을 저하시킬 수 있다^[3]. 이와 같이 저하된 링크의 품질은 해당 링크를 경유하는 데이터 전송의 손실을 야기할 수 있다.

링크 품질을 평가하기 위한 기존의 연구들은 다음과 같이 크게 3가지 방법으로 구분할 수 있다. 가장 기본적인 방법은 두 노드 사이에서 다수의 패킷을 교환하고 성공적으로 송·수신된 패킷의 비율인 PDR(Packet Delivery Rate)을 계산하는 방법이다. 이러한 방법은 실질적으로 링크의 품질을 평가할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 교환되는 메시지의 수에 따라 얻어지는 링크 품질의 평가 결과의 정확도가 차이를 보이게 된다. 따라서 보다 좋은 정확도를 얻기 위해서는 많은 수의 메시지 교환이 이루어져야 한다. 다수의 메시지 교환은 링크 품질 평가를 위하여 많은 시간과 추가적 에너지 소비를 유발하는 단점을 가지고 있다. 다른 두 방법들은 IEEE802.15.4를 기반으로 하는 통신 칩에서 제공하는 LQI(Link Quality Indication)와 RSSI(Received

Signal Strength Indication)을 이용한다. 이러한 LQI 또는 RSSI를 사용하는 방법은 모든 패킷이 수신되는 과정에서 얻어지므로 다수의 패킷 교환 없이 링크의 품질을 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다. LQI는 패킷을 수신할 때 최초 8 symbols (4바이트)의 평균 상관관계수 값을 나타낸다. 이 값은 주로 통신 채널 상의 전파방향 및 다중경로에 영향을 받는다. LQI를 사용하여 링크의 품질을 평가한 방법은 패킷의 수신 순간만의 채널 상황을 반영하고, 평가 결과의 변별력이 낮은 단점을 가지고 있다. RSSI는 일반적으로 두 노드사이의 통신 거리와 관계를 가지며 수신된 패킷의 신호 강도를 나타낸다. 그러나 RSSI는 수신칩의 최대 수신 감도 주변에서 급격한 변화를 보이는 특성을 가지는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 대규모 무선센서네트워크를 구성하고, 운영에 들어가기까지 필요한 시간 및 에너지 소비를 최소화하기 위하여 통신 칩에서 제공하는 LQI와 RSSI를 동시에 활용하여 각 링크의 링크 품질을 평가할 수 있는 HLQM(Hybrid Link Quality Metric)을 제안하였다. HLQM을 사용하여 링크 품질을 평가하면, 다수의 패킷 전송과정을 거친 후 얻어진 결과를 링크 품질 평가에 이용하는 기존의 방법들이 가지는 네트워크를 구성하고 운영에 들어가기까지 많은 set-up time과 비용이 소요되는 문제점과 LQI 또는 RSSI를 각각 사용하는 방법들이 가지는 문제점도 개선되어 보다 효율적으로 링크 품질을 평가할 수 있게 된다.

II. 관련 연구

점차 활용 분야가 넓어지는 무선센서네트워크 시스템의 안정적인 동작을 위하여 통신의 링크 품질을 활용한 네트워크 프로토콜에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 또한 링크의 품질을 보다 효율적으로 평가할 수 있는 방법이 다수 제안되었다. 무선센서네트워크에서 링크의 품질을 평가하는 방법들과 링크의 품질에 기반을 둔 라우팅 프로토콜에 대한 대표적인 기존 연구들과 문제점은 다음과 같다.

Polastre et al^[4]은 ChipCon사의 CC2420 기반의 Telos mote를 활용하여 평균적으로 계산된 LQI가 RSSI보다 링크의 품질을 잘 대변한다는 연구 결과를 제시했으며, Lei Tang et al^[5]은 금속 성분이 많이 산재한 공장 환경에서의 IEEE 802.15.4기반 무선통신 특성

과 링크 품질의 특성을 LQI와 RSSI를 활용하여 평가하는 연구를 진행했다. K. Srinivasan et al^[6]은 ChipCon사의 CC2420기반의 MicaZ를 활용하여 다른 연구들에서 링크의 품질을 평가하는데 낮게 평가되었던 RSSI와 PRR(Packet Reception Rate)과의 상관관계를 파악하여 적은 에너지 소비를 통한 링크의 품질을 평가하는 연구를 수행하였다. 그러나 이 연구에서 사용한 RSSI 값은 주변 환경에 의한 간섭 및 다중 경로와 같은 문제점에 효과적으로 대처하지 못하는 단점을 가지고 있다. A. Woo et al^[7]의 연구에서는 링크 품질 임계값의 최단 경로 메트릭은 홉 카운트 등을 사용하여 최단거리 경로 SP(t)를 구성하는 과정에서 특정 임계값(threshold) t를 사용하여 임계값 이하의 경로를 배제시켜 구성하는 방법을 사용한다. 이러한 방법은 나쁜 품질의 링크 사용을 회피할 수 있지만 경로의 품질을 구별해 주지는 못하는 단점이 있다. M. D. Yarvis et al^[8]의 저 전력 무선네트워크를 위한 링크 품질 기반 라우팅과 관련된 초기의 연구에서는 DSDV(Destination Sequenced Distance Vector)^[9]를 사용하였다. 이러한 방법에서는 링크의 품질을 파악하기 위하여 PDR을 사용하였다. 평균 PDR 값을 대수 변환을 통하여 링크 비용(link cost)으로 변환되며 정수역(integer domain)으로 정규화 된다. 경로 비용(path cost)은 경로를 구성하는 링크 비용의 합으로 계산되어진다. 링크 비용의 합을 계산하는 것은 각 링크에서 패킷의 전달률을 나타내는 PDR의 곱셈과 같은 결과를 나타낸다. 따라서 라우팅 메트릭(routing metric)은 PDR을 최대화 하는 방식을 갖는다. ETX(Expected Transmission Count)^[10]는 IEEE802.11과 같은 고속 무선 메쉬 네트워크의 성능을 향상시키기 위해 홉 카운트 메트릭(hop count metric)의 대응으로 사용되어진 방법이다. ETX는 링크를 통하여 전송되어질 것으로 예상되는 패킷의 수를 예측한다. 이 메트릭은 패킷 송·수신 과정에서 패킷 전송 에러 확률만 계산하면 되는 경우에 많이 사용되어왔다. 전체 경로의 비용은 경로에 있는 각 링크의 ETX 값의 합으로 계산되어진다. 링크의 ETX 메트릭을 계산하기위하여 일반적으로 노드는 주기적으로 broadcast probe message를 주변의 노드에 전송하고, 정의된 시간동안 도착하는 답신의 수를 계산한다. 이러한 방법은 일반적으로 HELLO 메시지를 이용하여 구현되므로 저 전력 환경에서 주기적인 control message의 전송은 크게 부담이 되어 조기에 배터리 방전을 유발할 수 있다. K.Kim et

al^[11]는 경로를 구성하는 링크들에서 특정 임계값 이하의 LQI를 가지는 나쁜 링크의 수 WL(Weak Link)을 가장 적게 가지는 경로를 선택하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 경로를 구성하는 WL의 수와 홉 카운트 HC(Hop Count)의 쌍을 (WL, HC)로 파악하고, 파악된 경로의 링크 비용 배열을 사전순서로 정렬한다. 이러한 방법의 정렬은 WL이 낮은 링크를 선택하고 같은 WL을 가지는 경로에 대하여 HC가 가장 낮은 경로를 선택하는 방법이다. 이 방법은 좋은 품질로 구성된 경로의 품질을 서로 구별할 수 없는 단점을 가지고 있다. MAX-LQI 방식은 가장 낮은 LQI가 가장 높은 링크를 가지는 경로를 선택하는 방법으로 B.Chen et al^[12]에 의해 제안되었다. 이 메트릭은 route discovery procedure 과정에서 control message의 LQI 값을 사용하여 구현되고 있다. MAX-LQI는 가장 나쁜 경로의 경우를 고려하기 때문에 정밀한 결과를 얻을 수 없다. 또한 B.Chen et al^[12]은 송신자와 수신자 사이의 경로에 대하여 가장 높은 PDR을 가지는 경로를 선택하는 방법인 PATH-DR을 제안하였다. 그러나 이 방법은 홉 카운트와 무관하게 계산된 값을 사용하여 홉 카운트와 관련된 무선통신 오버헤드를 고려하지 않았다.

III. LQI 와 RSSI를 기반한 HLQM

3.1 LQI와 RSSI 값의 변화에 따른 링크 품질의 특징
 링크 품질에 기반한 라우팅에서 가장 중요한 부분은 링크 품질을 효율적으로 평가하는 방법이다. 기존의 많은 연구에서는 PDR을 이용하여 링크 품질을 평가하는 방법을 사용해왔다. PDR은 전체 송신한 패킷의 개수와 수신한 패킷의 개수에 대한 비율로서 100개의 패킷을 송신하고 97개의 패킷을 올바르게 수신하였다면 PDR은 97%가 된다. 그러나 이러한 방법은 네트워크를 구성하여 서비스를 제공하기위해 많은 시간과 에너지를 소모하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 IEEE802.15.4를 기반으로 하는 통신 칩에서 제공하는 LQI와 RSSI를 활용하여 링크 품질을 평가하는 방법을 제안한다. LQI와 RSSI는 통신 칩에서 제공하며, LQI는 패킷을 수신할 때 최초 8 symbols (4바이트)의 평균 상관관계수(correlation) 값을 나타낸다. 이 값은 주로 통신 채널 상의 전파방해 및 다중경로와 관련이 있다. RSSI는 일반적으로 통신거리와 관계를 가지며 수신된 패킷의 신호 강도를 나타낸다. 그림 1은 LQI와 RSSI 값의

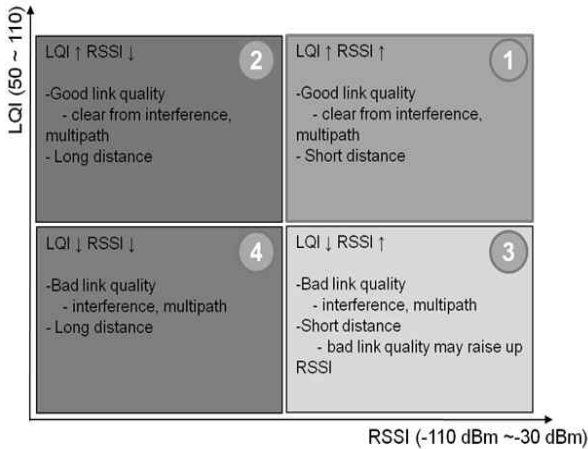


그림 1. LQI와 RSSI 값의 변화에 따른 링크 품질의 특징

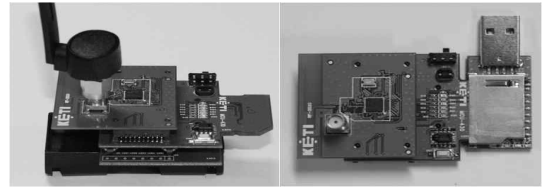
Fig. 1. Link quality characteristics as LQI and RSSI values.

변화에 따른 링크 품질의 특징을 나타낸다.

그림 1에서 ①에 해당하는 영역은 좋은 LQI와 RSSI 값을 가지는 영역이다. 이 영역은 다른 영역에 비하여 짧은 통신거리와 깨끗한 통신 채널환경을 나타내어 경로 설정 시 가장 좋은 링크로 구분된다. ④에 해당하는 영역은 LQI와 RSSI 값에 대하여 상대적으로 모두 나쁜 평가 값을 가진다. 이 영역에 해당하는 링크는 경로 설정 시 회피해야 하는 링크이다. ②의 영역은 좋은 LQI 값을 가지는 반면에 낮은 RSSI 값을 가지는 영역으로 낮은 RSSI 값을 보상하기 위하여 추가적 노드의 배치 또는 노드의 위치 이동이 필요한 영역이다. ③의 영역은 높은 RSSI와 낮은 LQI를 가지는 영역으로 채널 환경에 따라 사용 통신 채널의 변경이 필요한 영역이다.

3.2 LQI 및 RSSI와 PDR의 연관관계 분석

LQI와 RSSI의 값을 동시에 활용하기 위하여 본 연구에서는 LQI와 RSSI 값의 변화에 따른 PDR의 연관관계를 실험에 의해 측정하고 분석하였다. 측정에 사용된 노드는 그림 2와 같은 TI사의 MSP430-f2618 MCU와 IEEE802.15.4 호환 2.4GHz 대역의 CC2520을 사용하였다. CC2520은 최대 수신 감도 -98 dBm의 특성을 보인다^[13]. 실험에 사용한 출력 파워는 0dBm을 사용하였다. 송신측 노드는 20 바이트의 길이 패킷을 100번 송신하며 수신측 노드에서 전송된 패킷의 정보를 바탕으로 RSSI, LQI 및 PDR을 계산하였다. 실험은 송수신 거리 변화 및 Bluetooth와 무선랜을 이용하여 전송 환경을 변화시키며 130회 실행되어 총 13,000의 송수신에 대한



(a) 송신측 노드 (b) 수신측 노드

그림 2. CC2520기반의 무선센서네트워크 노드

Fig. 2. CC2520 based WSN nodes.

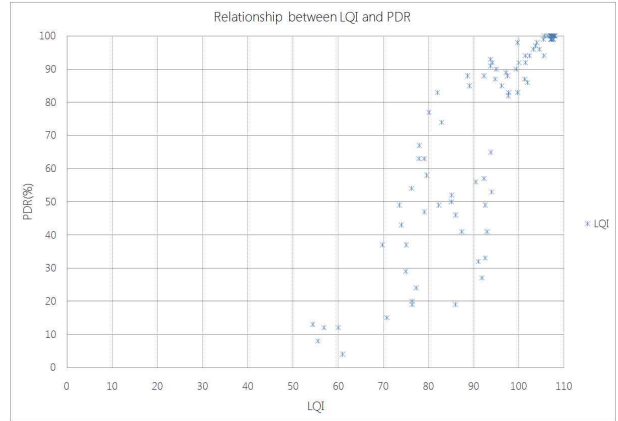


그림 3. LQI값의 변화에 따른 PDR 값

Fig. 3. Relationship between LQI and PDR.

결과를 분석하였다.

그림 3은 실험에서 얻어진 LQI 값의 변화에 따른 PDR 값의 변화를 나타낸다. 실험에서 측정된 자료를 사용하여 상관분석(correlation analysis)을 한 결과 LQI 값의 변화에 따른 PDR 값의 변화는 선형적 상호관계가 있는 것으로 분석되었다. LQI 값의 변화에 대하여 PDR 값의 변화가 선형적 상호관계를 가진다는 것은 LQI 값의 변화 범위 내에서 고정된 변화율로 PDR 값이 변화한다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용한 CC2520의 경우에 칩 규격에서 제공하는 최소 LQI값은 50이며 최대 LQI값은 110이다^[13]. 따라서 이 구간에서 LQI 값이 증가하면 PDR 값도 고정된 변화율로 증가될 것으로 추정된다.

그림 4는 실험을 통해 측정하여 얻어진 RSSI 값의 변화에 따른 PDR 값의 변화를 나타낸다. 실험에서 측정된 자료를 사용하여 상관분석을 한 결과 RSSI 값의 변화에 따른 PDR 값의 변화는 지수적 상호관계가 있는 것으로 분석되었다. RSSI 값의 변화에 대하여 PDR 값의 변화가 지수적 상호관계를 가지므로 그림 4에서 CC2520의 수신 감도 경계인 -98dBm에서 급격한 변화를 보이게 된다. 따라서 수신 감도 경계인 -98dBm 보다 신호 감도가 낮은 구간에서는 RSSI 값의 변화에 따른 PDR 값의 변화

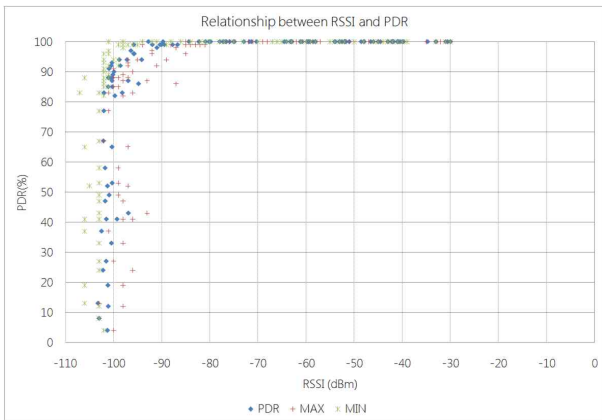


그림 4. RSSI 값의 변화에 따른 PDR 값
Fig. 4. Relationship between RSSI and PDR.

는 상대적으로 변화율이 매우 적을 것으로 추정된다.

3.3 하이브리드 링크 품질 메트릭 HLQM 정의

본 연구에서는 LQI와 RSSI 값의 변화에 따른 링크 품질의 특징을 파악하고, LQI와 RSSI 값과 PDR 값의 상호 연관 관계를 분석한 결과를 바탕으로 LQI와 RSSI 값을 동시에 활용할 수 있는 하이브리드 링크 품질 메트릭 HLQM(Hybrid Link Quality Metric)을 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$HLQM(x,y) = w_L \times L(x) + w_R \times R(y)$$

$$\begin{aligned} x &: LQI \\ y &: RSSI \\ w_L &: \text{weight factor for } LQI \\ w_R &: \text{weight factor for } RSSI \\ L(x) &: \text{transformation function for } LQI \\ R(y) &: \text{transformation function for } RSSI \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)은 측정된 LQI 및 RSSI 값을 이용하여 PDR을 구하는 변환함수 $L(x)$ 와 $R(x)$ 의 가중평균(weighted mean)을 사용하여 PDR 값을 추정하는 방법을 사용한다. 식(1)에서 LQI에 대한 변환함수 $L(x)$ 는 그림 3과 같이 측정된 실험 결과를 사용하여 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 하면, 측정 LQI값 x 에 대한 PDR값 $L(x)$ 를 추정하는 $L(x) = 1.8424x - 98.674$ 과 같은 식으로 나타난다. 그리고 이 변환함수는 각 통신칩 규격에서 제공하는 최대 LQI값과 최소 LQI값을 이용하여 근사화하여 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$L(x) = (x - MIN_LQI) \times \frac{100}{MAX_LQI - MIN_LQI} \quad (2)$$

본 연구에서 사용한 CC2520의 경우 칩 규격에서 제공하는 MAX_LQI값은 110이며 MIN_LQI값은 50이다^[13].

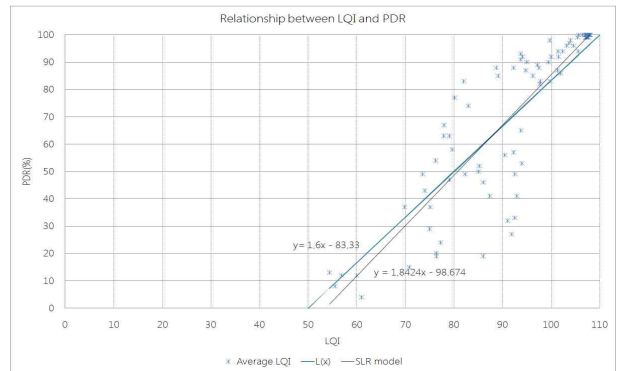


그림 5. 실험 측정 결과와 LQI 변환함수의 관계
Fig. 5. Relationship between experimental result and LQI transformation function.

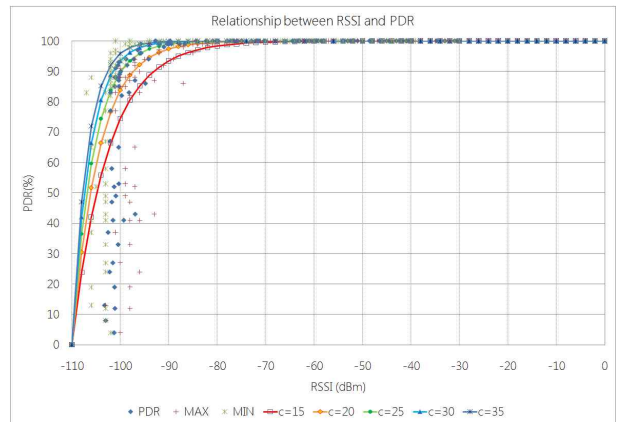


그림 6. 실험 측정 결과와 RSSI 변환함수의 관계
Fig. 6. Relationship between experimental result and RSSI transformation function.

따라서 위의 식(2)는 측정된 50에서 110사이의 LQI 값은 0에서 100 사이의 PDR 값으로 변환한다.

식(1)에서 사용된 RSSI의 변환 함수 $R(y)$ 는 그림 4의 측정된 결과에서 RSSI와 PDR 값 사이에 지수적 상호관계가 있는 것으로 분석되어 측정 허용 RSSI 값 -110dBm와 -30 dBm 사이의 신호강도 감쇠율을 반영하여 식(3)과 같은 지수변환함수(exponential transformation function)로 정의하여 사용한다. 식(3)은 측정된 RSSI 값을 0에서 100사이의 PDR 값으로 변환한다.

$$R(y) = (1 - e^{((\frac{y}{MIN_RSSI} - 1.0) \times c)}) \times 100 \quad (3)$$

그림 6에서는 측정된 RSSI 값에 대하여 식(3)에서 상수 c 의 값을 다양하게 선택하여 다양한 형태의 변환함수를 도출하여 적합화하여 보았다. 변환함수 $R(x)$ 의 상수 c 는 그림 6에서와 같이 변환함수의 변곡점에서의 변화율에 영향을 주는 상수이다. 즉, 상수 c 의 값이 커

질수록 LQI 값의 변화에 대하여 변곡점 부근에서 변환 함수 $R(x)$ 의 값이 상대적으로 크게 변하게 된다.

그림 4의 측정 자료를 사용하여 식(3)에서 상수 c 의 값을 다양하게 선택하여 다양한 형태의 변환함수를 도출하여 적합화를 실시하였다.

그리고 평균자승오차(mean square error)가 $c=25$ 일 때 가장 작기 때문에 $c=25$ 를 적용하여 변환함수 $R(x)$ 을 정의하여 사용한다.

식(1)과 같이 정의된 하이브리드 링크 품질 매트릭 HLQM은 그림 5와 그림 6의 분석 결과를 종합하여 주어진 응용 환경에 보다 적합하게 식(4)의 형태로 구체화하여 실험에 적용한다.

$$HLQM(x, y) = 0.31 \times (x - 50) \times \frac{100}{110 - 50} + 0.69 \times (1 - e^{((\frac{y}{-110} - 1.0) \times 25)}) \times 100 \quad (4)$$

식(4)에서 변환함수 $L(x)$ 와 $R(y)$ 의 가중평균을 위한 가중치 w_L 과 w_R 의 값은 링크 품질 특징과 변환함수 적합화 과정의 분석 자료를 바탕으로 휴리스틱 방법(heuristic method)으로 결정하였다. 그림 3에서 LQI의 표준편차(standard deviation)는 6.257이며 그림 4에서 RSSI의 표준편차는 2.816이다. LQI에 비해 RSSI는 상대적으로 표준편차는 적으나 그림 6에서 보면 CC2520의 수신 감도 경계인 -98dBm에서 급격한 변화를 보이고 있다. 그리고 $L(x)$ 는 선형 변환함수이기 때문에 주어진 LQI의 변화가 항상 고정된 변화율로 링크 품질에 영향을 주기 때문에 상대적으로 $R(x)$ 에 비해 평가의 민감도를 크게 고려할 필요가 없다. 따라서 본 연구에서는 가중평균을 위한 가중치를 표준편차에 반비례하게

$w_L = 0.310$ 과 $w_R = 0.690$ 로 결정하였다.

그림 7은 LQI 및 RSSI 값의 변화에 따른 식(4)에서 정의한 HLQM 값의 변화를 나타낸다.

그림 7에서 HLQM은 CC2520의 수신 감도 경계인 -98dBm 이하에서는 상대적으로 RSSI의 영향을 많이 받으며 그 이상의 구간에서는 상대적으로 LQI값에 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 따라서 HLQM으로 링크 품질을 평가하게 되면 LQI와 RSSI의 값의 변화에 동시에 보다 효율적으로 평가할 수 있게 된다.

IV. 실험 및 성능 분석

링크 품질 매트릭 HLQM의 타당성과 효율성을 검증하기 위하여 본 연구에서 제안된 방법을 통한 부모노드 선택과 실제 100회의 데이터 송수신으로 얻어진 PDR과의 비교 실험을 수행하였다. 실험은 일반 무선랜 AP가 5개와 블루투스 기기 3개가 있는 50m×10m 사무실 환경에서 수행되었다. 실험에 사용된 무선센서네트워크 노드는 MSP430 MCU와 2.4GHz 대역의 CC2520 6개의 노드를 사용하여 0dBm의 출력을 사용하였다. 5개의 노드는 부모 후보노드의 역할을 수행하고 나머지 1개의 노드는 네트워크에 새로이 참여하려는 노드의 역할을 수행한다. 5개의 부모 후보 노드로는 3개의 비컨을 송신하고, 이 비컨을 수신 받은 노드는 수신 받은 비컨을 이용하여 RSSI, LQI 및 HLQM을 이용하여 부모 후보 노드와의 링크 품질을 평가한다.

실험 거리는 10m에서 50m까지 5m 간격으로 부모노드 5개의 위치를 변경하며 실험하였다. 각 위치에 따른 실험은 2개의 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 부

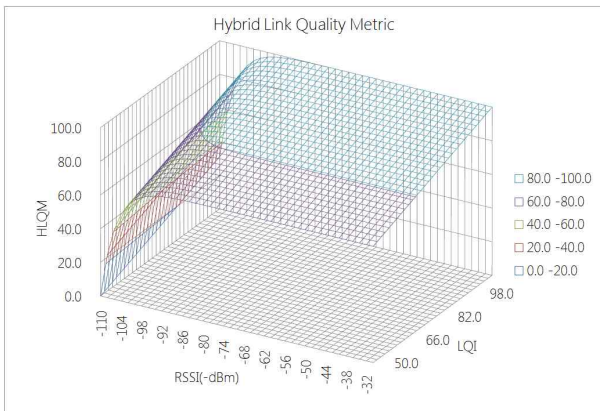


그림 7. LQI 및 RSSI값의 변화에 따른 HLQM 값
Fig. 7. HLQM values as LQI and RSSI values.

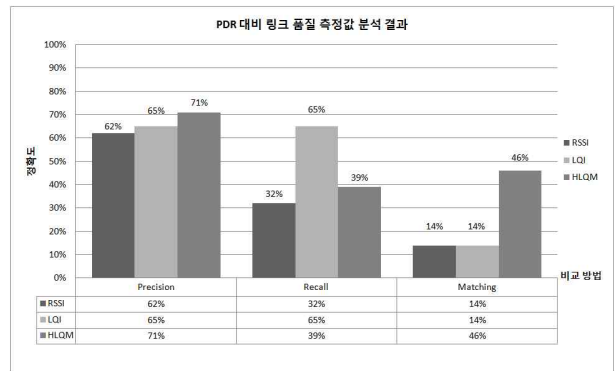


그림 8. RSSI, LQI 및 HLQM을 통한 링크 품질의 정확도
Fig. 8. Experimental Result for RSSI, LQI and HLQM.

모 후보노드는 각각 3개의 비컨 메시지를 송신하고, 이를 수신받은 노드는 수신받은 3개의 비컨을 이용하여 LQI, RSSI 그리고 HLQM을 통한 링크의 품질을 평가한다. 두 번째 단계에서는 실제 각 5개의 노드와 100개의 메시지를 교환하여 PDR을 측정하였다.

그림 8은 RSSI, LQI 및 HLQM을 통하여 얻어진 링크 품질과 실제 100개의 메시지 전송으로 얻어진 PDR과의 정확도를 나타내기 위해 계산된 재현율(recall), 정확도(precision) 및 일치율(matching)이다. 그림 8의 결과와 같이 LQI 또는 RSSI 만을 사용하는 방법과 비교하여 HLQM이 정확도 측면에서 평균적으로 약 10%정도 높은 결과를 보여준다. 이러한 결과는 각 메트릭이 찾아낸 가장 좋은 링크가 실제 메시지 전송을 통하여 얻어진 가장 좋은 링크 품질을 가지는 링크와 얼마나 일치하는지를 보여준다. 재현율의 경우에는 실제의 PDR에서 가장 좋은 결과를 보인 링크를 각 메트릭이 얼마나 찾아냈는가를 나타내준다. LQI의 재현율이 높은 이유는 실험의 결과에서 LQI 값이 변별력을 가지지 못하고, 좋은 품질의 링크로 다른 메트릭에 비하여 많은 링크를 찾아냈기 때문이다. 전체 실험에 대하여 5개의 후보 링크 중에서 RSSI에 의해 선택된 가장 좋은 링크의 수는 1.02이며 LQI는 2.52 그리고 HLQM은 1.25의 값을 가진다. 또한 5개의 후보 링크와 PDR을 통한 얻어진 가장 좋은 모든 링크사이의 일치율은 HLQM이 다른 메트릭에 비하여 약3.2배 좋은 결과를 보여준다. 이 결과는 네트워크에서 다중 경로를 설정하거나, 흡수와 같은 다른 메트릭과 결합하여 최종 경로를 설정할 때 LQI 또는 RSSI 만을 사용하는 경우에 비하여 HLQM이 보다 효율성이 높다는 것을 나타내고 있다.

V. 결 론

대규모 무선센서네트워크를 설치하고 운영하는데 링크의 품질에 기반을 둔 통신의 경로 수립은 네트워크의 안정성을 확보하는데 가장 중요한 요소이다. 그러나 경로 수립에 필요한 링크의 품질을 파악하는데 사용되는 많은 메시지의 교환은 전원의 낭비와 네트워크가 안정화되는데 긴 시간을 필요로 한다.

본 연구에서는 대규모 무선센서네트워크를 구성하고, 운영에 들어가기까지 필요한 시간 및 에너지 소비를 최소화하기 위하여 통신 칩에서 제공하는 LQI와 RSSI를 활용하여 각 링크의 링크 품질을 평가할 수 있는

HLQM을 제안하였다. 그리고 제안된 방법의 타당성과 효율성을 검증하기 위하여 실제 다수의 메시지 전송에서 얻어진 PDR과 비교하는 실험을 수행하였다. 실험의 결과에서 HLQM을 사용하면 다른 메트릭을 사용하여 얻어진 결과에 비해 정확도, 재현율 및 일치율이 상대적으로 우수하다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 HLQM은 실제 무선센서네트워크에서 많이 사용하는 IEEE802.15.4를 기반으로 구성된 대규모의 무선센서네트워크 환경에 적합한 라우팅 프로토콜에 대한 연구에 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE802.15.4-2006. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [2] ZigBee Alliance, ZigBee Specification Version 1.0, <http://www.zigbee.org>, December 14th, 2004.
- [3] R. N. Murty, et al., "CitySense: An urban-scale wireless sensor network and testbed," in IEEE HST'08, Waltham, MA, May 2008, pp. 583 - 588.
- [4] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, "Telos: enabling ultra-low power wireless research," in IPSN '05: Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005, pp. 364-369.
- [5] Tang, L.; Wang, K-C.; Huang, Y.; Gu, F. Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4 Compliant Radio for Factory Environments. IEEE Trans. on Industrial Informatics 2007, 3(2), 99-110.
- [6] K. Srinivasan and P. Levis, "RSSI is Under-Appreciated," in Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors(EmNetS), 2006.
- [7] A. Woo, T. Tong, and D. Culler, "Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks," in Proceedings of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03), Los Angeles, USA, November 2003.
- [8] M. D. Yarvis, W. S. Conner, L. Krishnamurthy, A. Mainwaring, J. Chhabra, and B. Elliott, "Real-world experiences with an interactive ad hoc sensor network," in Proceedings of the International Conference on Parallel Processing

- Workshops, Vancouver, Canada, August 2002.
- [9] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," in Proceedings of the ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications (SIGCOMM '94), London, UK, September 1994.
- [10] S. J. de Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," in Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03), San Diego, USA, September 2003.
- [11] K. Kim, S. Daniel Park, G. Montenegro, S. Yoo, and N. Kushalnagar, "6LoWPAN Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing (LOAD)," draft-daniel-6lowpan-load-adhocrouting-03.txt, IETF Internet Draft (work in progress), June 2007.
- [12] B. Chen, K.-K. Muniswamy-Reddy, and M. Welsh, "Ad-hoc multicast routing on resource limited sensor nodes," in Proceedings of the 2nd International Workshop on Multi-Hop Adhoc Networks: From Theory to Reality (REALMAN '06), Florence, Italy, May 2006. CC2520
- [13] CC2520 DATASHEET 2.4 GHZ IEEE 802.15.4 /ZIGBEE® RF TRANSCEIVER.
<http://www.ti.com/cn/lit/gpn/cc252033>, 2002.

 저 자 소 개



이 상 신(정회원)
 1997년 한국외국어대학교 수학과
 학사 졸업.
 2000년 한국외국어대학교 컴퓨터
 공학과 석사 졸업
 2008년 한국외국어대학교 컴퓨터
 공학과 박사 수료.

2000년~현재 전자부품연구원 선임연구원
 <주관심분야 : 센서네트워크, Ad-hoc 네트워크>



김 상 철(정회원)-교신저자
 1983년 서울대학교 컴퓨터공학과
 학사 졸업
 1994년 미시간주립대학교 컴퓨터
 공학과 박사 졸업
 1994년~현재 한국외국어대학교
 컴퓨터공학과 교수

<주관심분야 : USN, 멀티미디어 시스템, 컴퓨터
 게임>



김 중 환(정회원)
 1974년 서울대학교 응용수학과
 학사 졸업
 1977년 고려대학교 산업공학과
 석사 졸업
 1984년 고려대학교 산업공학과
 박사 졸업

1974년~1984 육군사관학교 수학과 부교수
 1985년~현재 한국외국어대학교 컴퓨터공학과
 교수
 <주관심분야 : 멀티미디어, 소프트웨어공학>