

무선 센서 네트워크에서 가변주기를 이용한 적응적인 전송파워 제어 기법

(Adaptive Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks)

이 정 욱^{*} 정 광 수^{**}
(Jungwook Lee) (Kwangsoo Chung)

요약 무선 센서 네트워크에서는 전송파워 제어를 이용하여 전력소비를 줄이고 채널간의 간섭을 줄일 수 있다. 무선 링크의 품질은 시간 및 공간적인 상황에 따라 변화하기 때문에 링크의 실패가 빈번하다. 기존의 전송파워 제어 기법은 링크 품질 변화에 적용할 수 있도록 주기적으로 이웃 노드와 비컨 패킷을 주고 받아 동적으로 전송파워를 조절하도록 하였다. 하지만 전송파워를 조절하는 주기에 따라서 링크 품질의 변화에 적응하는 시간과 트래픽 및 에너지 오버헤드에 영향을 줄 수 있다.

본 논문에서는 링크의 품질변화에 따른 동적인 전송파워 제어 기법과 전송파워 제어 주기를 변경하는 기법을 제안한다. 이를 통하여 링크가 불안정할 때에는 전송파워 제어 주기를 감소시켜 민첩하게 링크 품질을 유지하며, 링크가 안정할 때는 전송파워 제어 주기를 증가시켜 이에 따른 프로토콜의 오버헤드를 줄이고자 하였다.

키워드 : 센서 네트워크, 전송파워 제어 주기, 신뢰성, 에너지 효율

Abstract In the wireless sensor networks, power consumption and interference among the nodes can be reduced by using the transmission power control. Because link quality is changed by spatial and temporal effect, link failures are frequently occurred. In order to adapt to link quality variation, existing transmission power control schemes broadcast beacon messages periodically to neighbor nodes and control the transmission power dynamically. However, it can effect on the time and energy overhead according to period of transmission power control.

In this paper, the dynamic method of transmission power control by the link quality variation and variable period are proposed. When a link quality is unstable, the control duty cycle is reduced and the link quality is agilely maintained. In contrast, when link quality is stable, the control period is increased and control overhead is decreased.

Key words : Sensor Networks, transmission power control period, Reliability, Energy Efficiency

1. 서론

센싱과 데이터 통신의 능력을 지닌 작은 디바이스로 동작하는 무선 센서 네트워크의 노드는 다양한 환경에 설치되어 센싱된 정보를 모니터링하거나 원격지 노드를 제어한다. 이러한 무선 센서 네트워크의 노드는 여러 가지 자원의 제약을 받는다. 첫 번째, 무선 링크는 에러 확률이 높다. 각각의 전송 범위 안에 해당하는 노드들은 데이터를 전송할 때 서로에게 간섭을 주기 때문에 데이터의 손실이나 지연을 발생시킨다. 또한 노드는 외부 환경에 노출될 수 있기 때문에 온도나 습도에 의해서 링크 품질이 변화되며, 멀티패스 페이딩과 셰도잉 같은 현상으로 링크 품질이 감소되는 특징을 지니고 있다. 두 번째, 노드는 배터리 전원을 공급받기 때문에 에너지의 제약을 받는다. 특히, 센서 노드의 구성인 센싱 유닛, 프로세싱 유닛, 송수신 유닛 중에서 대부분의 에너지 소비는 송수신 유닛에서 발생된다. 따라서 송수신 유닛에서 발생하는 에너지 소모를 최소화할 필요가 있다.

이와 같은 제약을 극복하기 위해 전송파워 제어를 통하여 송수신 유닛에서 발생하는 에너지 소모를 줄임과 동시에, 노드들 간의 간섭을 최소화하는 연구들이 진행되어 왔다[1]. 대부분 기법들은 링크 상태를 노드가 전송 범위 내에 있는지의 여부에 따라 이전의 링크 모델을 가정하여 전송 가능여부에 따라 연결성을 판단하는 이론적인 방법을 통하여 노드간의 간섭을 줄이고자 하였다[2,3]. PCBL(Transmission Power Control with Blacklisting)[4]은 실제 환경에서 검증된 기법으로 네트워크의 생성단계에서 수집된 PRR(Packet Reception

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다(2008-S-041-01, u-City용 센서네트워크 PHY/MAC 개발). 연구비 지원에 감사 드립니다.

** 이 논문은 2010 한국컴퓨터종합학술대회에서 '무선 센서 네트워크에서 가변 주기를 이용한 적응적인 전송파워 제어 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
jwlee@adams.kw.ac.kr

** 중신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2010년 7월 28일

심사완료 : 2010년 9월 28일

Copyright©2010 한국정보과학회: 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제16권 제11호(2010.11)

Ratio)과 같은 링크 품질을 통하여 전송파위를 제어하였다. 하지만 무선 링크의 품질은 시간 및 공간에 따라 다양하게 변화하기 때문에 변화하는 링크 품질에 적응적으로 대처할 수 없다.

이를 해결하기 위해 주기적으로 링크 상태를 파악하고 전송파위를 제어하는 기법들이 제안되었으나[5-7], 링크 품질측정과 전송파위를 제어하는 오버헤드는 링크의 상태에 관계 없이 주기적으로 발생되기 때문에 적응적으로 대처할 수 없는 문제점이 있다. 예컨대 사람이 많은 낮 시간에는 멀티패스 페이딩이 일어날 확률이 높아져 링크 품질이 매우 불규칙할 수 있다. 따라서 빈번하게 링크 정보를 업데이트 하고 민첩하게 전송파위를 제어하는 것이 효율적일 수 있다. 이와 반대로 안정한 링크 상태가 지속되는 경우에는 이와 같은 빈번한 업데이트는 불필요하게 다량의 트래픽을 발생시켜서 프로토콜의 오버헤드가 증가될 수 있다.

기존 연구들은 주기적으로 비컨 패킷을 브로드캐스팅하여 다양한 지표로 링크 품질을 측정하고 전송파위를 제어하는 일련의 피드백과정을 반복한다. 따라서 환경에 따라 변화하는 링크 품질에 민첩하게 대응하기 위해서는 빈번한 링크 품질 측정과 전송파위 제어가 필요하다. 또한 전송파위의 제어 패킷에 대한 오버헤드의 문제점을 해결하기 위해서는 새로운 적응적인 기법이 요구된다.

본 논문에서는 데이터 수신이나 주기적인 비컨을 통해 얻은 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 정보를 통하여 링크 상태를 파악하고 링크 품질의 변화여부에 따라 전송파위 제어 주기를 달리하는 새로운 전송파위 제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 링크 품질을 파악하여 전송파위를 제어하는 피드백 주기를 조절함으로써, 안정한 링크 상태에서는 업데이트 속도를 줄여 에너지 소모를 줄이고 링크가 불안정하거나 실패가 일어났을 때에는 민첩하게 전송파위를 제어하여 손실되는 패킷을 줄이고자 하였다. 마찬가지로 링크 품질이 매우 좋은 경우에는 민첩하게 전송파위를 줄여 에너지 소모를 줄이고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실증연구를 통하여 전송파위 제어 주기의 조절 필요성을 언급하며, 3장에서는 제안하는 가변주기 전송파위 제어 기법에 대하여 서술한다. 4장에서는 실험을 통하여 환경 변화에 따른 전송파위 주기의 영향에 대하여 살펴보고 기존에 제안된 전송파위 제어 기법과 성능 비교 실험을 하였다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 실증연구

실내환경에서 사람의 활동이 많은 시간과 활동이 없는 시간에 링크 품질인 RSSI의 변화양상을 파악하였다.

실험은 총 12시간 동안 대학원 연구실에서 이루어졌다. 두 개의 CC2420[8]을 장착한 Telosb[9] 노드를 7m떨어진 곳에 두고 송신측에서는 최대의 전송파위 레벨인 31(0dBm)로 설정하여 1초마다 데이터를 보냈다. 수신측에서는 수신 받은 데이터를 기반으로 RSSI를 측정하였으며, 시퀀스 넘버(Sequence Number)를 통하여 PRR을 구하였다.

그림 1은 실험 공간인 연구실에서 연구원들의 활동시간에 따른 링크 품질의 변화를 분석한 것이다. 연구원들이 주로 활동하는 21:30부터 1:30사이에서는 RSSI의 변화폭이 심각한 것을 파악할 수 있으며, 연구원들의 활동이 적은 1:30부터 8:40사이에서는 비교적 RSSI의 변화폭이 적은 것을 알 수 있다.

표 1에서와 같이 사람의 활동 유무에 따라서 RSSI의 표준편차가 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 또한 측정된 RSSI의 최대값과 최소값을 비교하였을 때 링크가 불안정한 시간에서는 최대 -29dBm의 차이를 보였으며 링크가 안정한 시간에서는 최대 -5dBm의 링크 품질 변화가 있었음을 확인할 수 있었다.

그림 1의 실험에서는 최대의 전송파위 레벨로 설정되어 변화하는 링크 품질에 영향을 받지 않았으므로 PRR 값은 100%에 가까운 값을 보였다. 하지만 전송파위 제어를 통하여 최적의 전송파위를 설정하고 있을 경우에는 시간에 따라 변화하는 링크 품질에 적응하지 못하여 패킷 손실의 우려가 있다.

동일한 실험환경에서 전송파위의 레벨로 3(-25dBm)으로 하였을 때의 RSSI의 변화는 그림 2와 같으며, 동일 시간에서의 PRR 변화는 그림 3과 같다. 그림 2와 같이 사람활동의 유무에 따라서 RSSI 변화 정도가 다르게 측정되었다. 그러나 최대 전송파위로 실험한 그림 1과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 RSSI가 측정되었다.

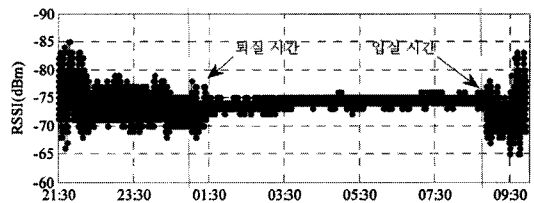


그림 1 시간에 따른 RSSI의 변화(0dBm)

표 1 퇴실시간 및 입실시간 기준의 RSSI 차이

	최대값	최소값	평균	표준편차
21:30~1:30	-66	-85	-73.13	2.03
1:30~8:40	-71	-76	-74.45	0.53
8:40~10:00	-65	-83	-71.99	2.41

단위: dBm

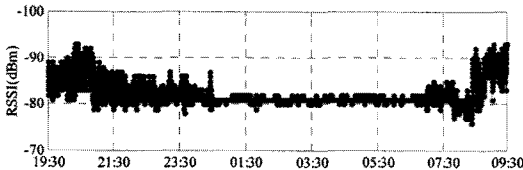


그림 2 시간의 변화에 따른 RSSI의 변화(-25dBm)

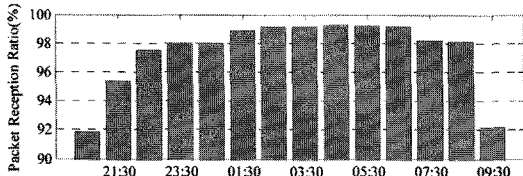


그림 3 시간의 변화에 따른 PRR의 변화(-25dBm)

CC2420은 수신 받은 신호를 디코딩할 수 있는 최소 임계값인 -97dBm이상의 신호일 경우에 데이터를 수신하게 된다. 최적의 전송파워가 설정된 상태에서는 링크 품질의 변화가 심할 때 임계값 이하로 변화될 확률이 높아지므로 패킷이 손실된다. 따라서 그림 3에서 링크 품질 변화가 심한 시간 동안 패킷 손실이 많은 것을 확인할 수 있다.

즉, 시간에 따라 변화하는 링크 품질에 적응하기 위하여 전송파워를 제어하여 보상하고자 할 때 링크 품질의 변화가 심한 구간에서 좀 더 빈번하게 조절하여 패킷 손실을 줄일 필요가 있으며, 링크 품질의 변화가 거의 없는 안정한 구간에서는 간헐적으로 전송파워를 제어하는 것이 에너지 효율측면에서 유리하다고 할 수 있다.

4. 가변주기 전송파워 제어 기법

제안하는 가변주기 전송파워 제어 기법은 크게 두 가지 단계로 이루어진다. RSSI기반으로 링크의 품질을 측정하는 단계와 이를 기반으로 전송파워를 적응적으로 제어하는 단계이다. 또한 링크 품질에 따라 가변적으로 주기를 설정하여 에너지 효율을 높이고 패킷 손실을 방지할 수 있다.

RSSI를 기반으로 링크의 품질을 측정하는 단계에서는 각각의 노드들이 주기적인 비컨 메시지를 통해 이웃 노드의 링크 품질을 측정하고 변화가 있을 경우에 피드백의 주기를 변경할 수 있다. 마찬가지로 데이터를 전송할 시에 링크 품질을 측정하게 된다. 하지만 데이터 전송을 통한 링크 품질 측정은 응용에서 요구되는 데이터 전송 주기에 의존하기 때문에 가변적인 주기 조절에 제약이 따른다. 따라서 데이터 전송을 통한 링크 품질측정은 비컨 메시지를 통한 링크 품질 측정의 피드백 주기를 변경할 때에만 참조될 수 있는 트리거 신호로만 이용될 수 있다.

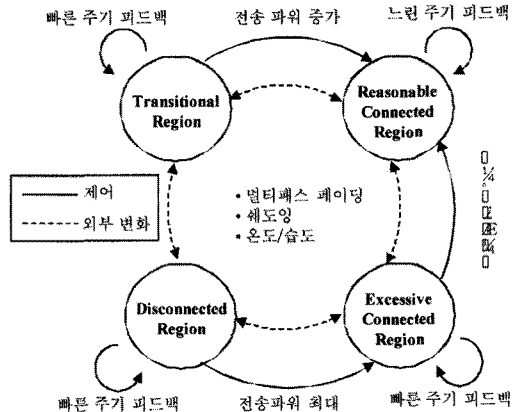


그림 4 상태 변화 개념도

그림 4는 가변 주기 전송파워 제어 기법의 상태 변화 개념도이다. 전송파워를 제어하는 단계에서는 RSSI의 상한 임계값과 하한 임계값을 비교하여 전송파워를 유지하거나 조절할 수 있도록 한다. 즉, 데이터 전송이나 주기적인 비컨을 통해 감지된 링크 품질이 임계값 범위 안에 해당될 경우(Reasonable Connected Region)에는 현재의 전송파워를 유지한다. 또한 이와 같이 안정한 링크에서는 불필요한 오버헤드를 줄이기 위하여 링크 품질을 측정하고 전송파워를 제어하는 피드백과정의 주기를 지수적으로 증가시켜 설정한 최대값을 주기로 변경을 시도한다.

하한 임계값의 이하로 측정되었을 때(Transitional Region)에 기준 노드는 해당하는 노드의 전송파워를 증가시키며, 상한 임계값의 이상으로 측정되었을 때(Excessive Connected Region)에는 전송파워를 감소시킨다. 이와 같이 불안정한 링크나 과도한 전송파워로 설정된 링크에서는 피드백과정의 주기를 최소화하여 전송파워를 변화시킨다.

이와 같이 불안정한 링크나 과도한 전송파워로 설정된 링크에서는 피드백과정의 주기를 최소화하여 변화된 링크 품질에 빠르게 적응될 수 있도록 한다. 또한 과도한 링크 품질의 변화로 노드의 연결이 실패되었을 때(Disconnected Region)는 전송파워를 최대로 설정하여 이웃 노드와의 연결을 시도한다.

그림 5는 본 논문에서 제안하는 가변주기 전송파워 제어 기법의 의사코드이다. $RSSI_{MAX_TH}$ 와 $RSSI_{MIN_TH}$ 는 RSSI의 상한, 하한 임계값이다. 여기서 $RSSI_{MIN_TH}$ 는 -80 dBm으로 설정하였는데, 이는 RSSI와 PRR의 상관관계 실험에서 그림 5와 같이 -80dBm이상에서 100%의 PRR을 보여주고 있기 때문이다. 또한 시간에 따른 RSSI의 변화 실험에서 안정적인 상황의 RSSI의 변화는 최대 5dBm의 변동이 있었다. 따라서 제안하는 기법의 $RSSI_{MAX_TH}$ 는 -75dBm으로 설정하였다. T_{MIN} 은 데이

```

Transmission Power Control with Variable Duty-cycle
1:  RSSIMAX,TH: RSSI Max Threshold, RSSIMIN,TH: RSSI Min Threshold
2:  TMAX: Beacon Max Time, TMIN: Beacon Min Time, T: Beacon Time
3:  N: Neighbor ID
4:  PCV: Power Control Variable(0 < PCV ≤ 31)
5:  INTERRUPT ROUTINE Timer0 fired(T [sec]) BCAST;
6:  WHILE
7:    IF (RSSIMAX > BCAST ACK(N) || DATA(N) ≥ RSSIMIN) THEN(
8:      T = * 2;
9:      IF(T > TMAX) THEN T = TMAX; ENDIF
10:     PCV = 20;
11:    ELSE IF (RSSIMIN > BCAST ACK(N) || DATA(N)) {
12:      T = TMIN;
13:      TX power = +( PCV / =2);
14:      IF(PCV > 31) THEN TX power = 31; } ENDIF
15:    ELSE IF (RSSIMAX ≤ BCAST ACK(N) || DATA(N)) {
16:      T = TMIN;
17:      TX power = -( PCV / =2);
18:      IF(PCV ≤ 0) THEN TX power = 1; } ENDIF
19:    ELSE {
20:      T = TMIN;
21:      TX power = 31; }
22:    ENDIF
23:  ENDWHILE
    
```

그림 5 가변 주기 전송파워 제어 기법

터의 전송 주기 값보다 작아야 링크 품질 변화에 민첩하게 대처할 수 있다. 따라서 데이터 전송 주기 이하로 설정해야 한다. T_{MAX} 값에 따라 비컨의 발생횟수와 패킷 수신율에 대한 요구사항을 충족시킬 수 있다. T_{MAX}의 값이 커질 수록 패킷 수신율이 감소되지만, 에너지 효율성이 극대화되는 측면이 있다. 즉, 응용의 요구사항에 따라 패킷 수신율과 에너지 효율성의 비중을 달리할 수 있다. 또한 PCV(Power Control Variable)는 전송파워의 레벨을 나타낸다. CC2420은 총 31단계로 전송파워를 조절할 수 있으며 이는 0에서 -25dBm까지 출력을 제어할 수 있다.

그림 5의 5번째 줄은 비컨의 타이머함수이며 T초마다 주기적으로 비컨을 브로드캐스팅하여 6번째 줄부터는 기준 노드가 수신한 각 이웃 노드의 비컨 ACK를 통하여 RSSI를 구할 수 있으며, 이 값을 기준으로 전송파워 제어의 여부를 결정한다. 전송파워를 제어할 필요가 없을 경우에는 8번째 줄과 같이 현재 비컨 주기를 2배씩 증가시켜 최대 1024초까지 도달한다. 이는 안정적인 링크에서의 불필요한 링크 품질 측정과 전송파워 제어를 억제한다. 전송파워를 제어할 경우에는 11, 15, 19번째 줄과 같이 비컨 주기를 1초로 초기화하여 측정하게 된다. 따라서 변화된 링크에 민첩하게 적응하게 된다. 또한 이 과정을 반복할 때마다 전송파워의 레벨을 반으로 줄이게 하여 미세한 제어를 할 수 있도록 한다.

5. 성능평가

제한하는 가변 주기를 이용한 전송파워 제어 기법의 성능평가를 위하여 그림 1과 같이 안정한 링크 품질과

불안정한 링크 품질 특성을 모델링한 환경에서 전송파워 변경 주기를 달리하여 실험을 하였다. 데이터 전송 주기는 8초로 설정하였으며 전송파워 변경주기는 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300초로 각각의 주기에서 3000초 동안 실험하였다. 실험 결과는 그림 6과 같다. 링크 품질의 변화가 심할 경우(Transitional Region)에는 전송파워의 변경주기가 120초 이하일 때는 90%이상의 PRR을 보여주었지만, 그 이상일 때부터는 PRR이 최대 38%까지 떨어지는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 링크가 불안정할수록 전송파워의 변경주기를 빠르게 가져야 변화된 링크에 빠르게 적응하여 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 이와 반대로 링크가 안정한 경우(Reasonable Connected Region)에서는 실험한 각각의 전송파워 변경 주기에서 90%이상의 PRR을 보여주었으며, 전송파워 변경주기에 덜 민감한 것을 알 수 있다. 따라서 링크가 안정할 때 주기를 짧게 하는 방법은 에너지나 트래픽 측면에서 효율적이지 못할 수 있다.

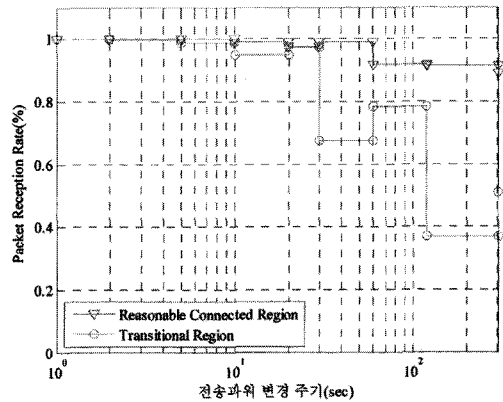


그림 6 전송파워 변경 주기방법에 따른 전송파워 변경 발생 횟수

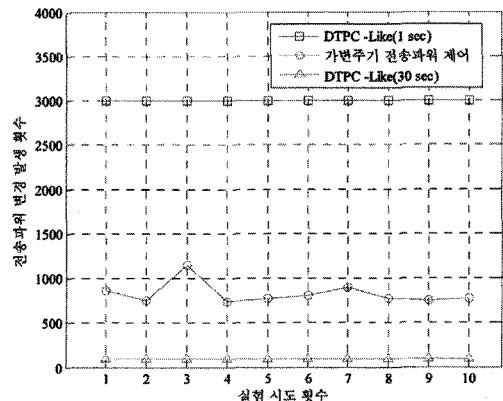


그림 7 전송파워 변경 주기방법에 따른 전송파워 변경 발생 횟수

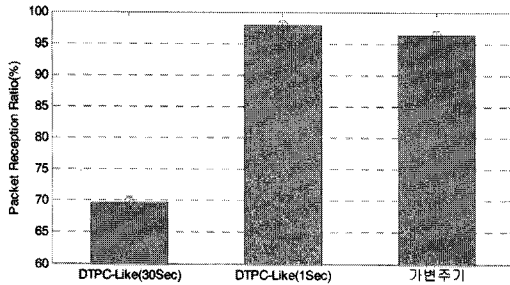


그림 8 전송파워 변경 주기방법에 따른 PRR

그림 7은 기존의 주기적인 링크 전송파워 제어 기법인 DTPC(Dynamic Transmission Power Control)의 주기를 1초, 30초 단위로 설정하여 제안한 가변주기 전송파워 제어 기법과의 비컨의 발생횟수를 비교한 것이다. 100m의 정사각형 공간에서 15개의 노드를 랜덤하게 배치하고 그림 1과 같이 링크를 모델링하여 총 3000초 동안 10회의 실험을 반복하였다. DTPC의 1초 주기와 30초 주기는 각각 3000, 100회의 비컨을 발생시켰으며, 제안한 기법은 평균 800회의 비컨을 발생하였다. 1초 주기의 DTPC는 그림 8의 PRR에 대한 실험 결과에서 평균 98%의 수신율을 보여주었지만, 전송파워 변경 횟수는 에너지소비와 프로토콜의 오버헤드에 비례한다고 볼 수 있기 때문에 3000개의 전송파워 변경 횟수는 비효율적이라고 할 수 있다. 반대로 30초 주기의 DTPC는 프로토콜의 오버헤드를 개선할 수 있지만 그림 8과 같이 PRR의 값이 69%로 현저하게 감소되는 것을 알 수 있다.

따라서 제안한 적응적인 가변주기 전송파워 제어 기법이 그림 1과 같이 링크 품질이 시간에 따라 변화하는 환경에서 좀더 효율적으로 전송파워를 조절하여 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 시간에 따라 변화하는 무선 링크의 변화 특성을 파악하였으며, 이와 같은 환경에서 기존에 제안된 일정한 주기의 전송파워 제어 기법이 적합하지 않다는 것을 확인하였다. 또한 RSSI와 PRR의 상관관계를 밝히는 실험에서 링크 품질의 변화여부를 판단할 수 있는 임계값을 도출할 수 있었다. 제안한 적응적인 가변주기 전송파워 제어 기법은 데이터 및 비컨 패킷을 통하여 임계값을 기준으로 링크 품질의 변화를 판단하였으며, 링크 품질에 따라 전송파워 제어 주기를 적응적으로 변경함으로써 신뢰성과 에너지 효율을 개선하였다.

제안한 기법은 전송파워 제어를 통한 프로토콜의 오버헤드 및 신뢰성 측면에서만 고려하였다. 향후에는 전송파워 제어를 통하여 제한된 무선 채널의 공간에서 노

드간의 간섭을 줄여 MAC에서의 충돌을 방지하며, 네트워크의 혼잡상황을 미연에 방지하는 방법들이 연구되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] I. Khemapech, A. Miller, and I. Duncan, "A Survey of Transmission Power Control in Wireless Sensor Networks," *In Proc. of Annual Postgraduate Symposium on The Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting*, pp.15-20, June 2007.
- [2] M. Burkhart, P. Rickenbach, R. Wattenhofer, and A. Zollinger, "Does Topology Control Reduce Interference?," *In Proc. of ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing*, pp.9-19, May 2004.
- [3] N. Li, J. Hou, and L. Sha, "Design and Analysis of an MST-Based Topology Control Algorithm," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.4, no.3, pp.1195-1206, May 2005.
- [4] D. Son, B. Krishnamachari, and J. Heidemann, "Experimental Study of the Effects of Transmission Power Control and Blacklisting in Wireless Sensor Networks," *In Proc. of IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp.289-298, October 2004.
- [5] S. Lin, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, J. A. Stankovic, and T. He, "ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks," *In Proc. of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.223-236, October 2006.
- [6] J. Jeong, D. Cullar, and J. Oh, "Empirical Analysis of Transmission Power Control Algorithms for Wireless Sensor Networks," *Technical Report No.UCB/EECS-2005-16*, University of California at Berkeley, November 2005.
- [7] G. Hackmann, O. Chipara, and C. Lu, "Robust Topology Control for Indoor Wireless Sensor Networks," *In Proc. of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.57-70, November 2008.
- [8] CC2420, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver, Texas Instruments, 2008.
- [9] TELOS-B, 2.4 GHz Mote Platform, Crossbow, 2007.