

연속 방송 패킷 전송에 의한 무선 센서 네트워크의 시각 동기화

배 시 규[†]

요 약

시각 동기화는 무선 센서 네트워크에서 시각 정보가 활용되는 응용(예, 감시, 추적, 데이터 융합, 스케줄링)에 있어서 중요하다. 무선 센서 네트워크에서의 시각 동기화는 기존의 유선 인터넷 망이나 다른 무선 통신망과도 다른 요구 사항을 만족해야 하는데, 이는 무선 센서 네트워크가 제한된 자원을 가지고 있기 때문이며, 그 중 특히 전력 소모가 가장 중요한 요소이다. 이 논문은 무선 센서 네트워크에서 동작하는 새로운 시각 동기화 방안에 관한 것으로 메시지 통신 부하를 줄여 결과적으로 전력 소모를 줄일 수 있다. 시뮬레이션 시험을 통해서 제안한 시각 동기화 방안이 기존의 방안보다 에너지 소모가 적으며 정확도가 향상되었음을 보인다.

키워드 : 클럭, 시각 동기화, 무선 센서 네트워크, 방송

Time Synchronization by Consecutive Broadcast for Wireless Sensor Networks

Shi-Kyu Bae[†]

ABSTRACT

Time synchronization is important role in a network, especially in Wireless Sensor Network (WSN) which is required for time-critical applications such as surveillance, tracking, data fusion and scheduling. Time synchronization in WSN should meet the other different requirements than the one in other networks because WSN has critical resource constraints, especially power consumption. This paper presents a new time synchronization scheme for WSN, which is energy efficient by reducing communication overhead. Simulation test shows this new scheme has better energy efficiency and performance of accuracy than existing schemes proposed previously.

Keywords : Clock, Time Synchronization, Wireless Sensor Networks, WSN, Broadcast

1. 서 론

무선 센서 네트워크에서 시간 동기화는 정확한 시간 정보가 요구되는 응용, 즉 감시나 목표 추적, 감지 데이터의 수집 분석, 스케줄링, 보안, 위치 측정(localization) 등에서 중요하다[1]. 무선 센서 네트워크에서의 시각 동기화는 유선 통신망에서와 달리 전력 소모와 네트워크의 변동성 등의 다른 요구 사항이 필요하다[1]. 즉, 제한된 자원(통신, 계산, 메모리, 전력 등)을 가지고 있으며 이동성과 토폴로지의 변화가 심하고 노드의 고장 가능성이 높은 변동성을 가지고 있고, 많은 수의 센서 노드로 구성되는 경우에도 잘 동작하여야 한다. 이 중에서도 에너지 효율이 가장 중요한 요소 중

에 하나이다. 시각 동기화에서 중요한 요소는 클럭 오프셋, 클럭 드리프트(또는 스큐) 그리고 전달 지연 시간(transmit delay)이다.

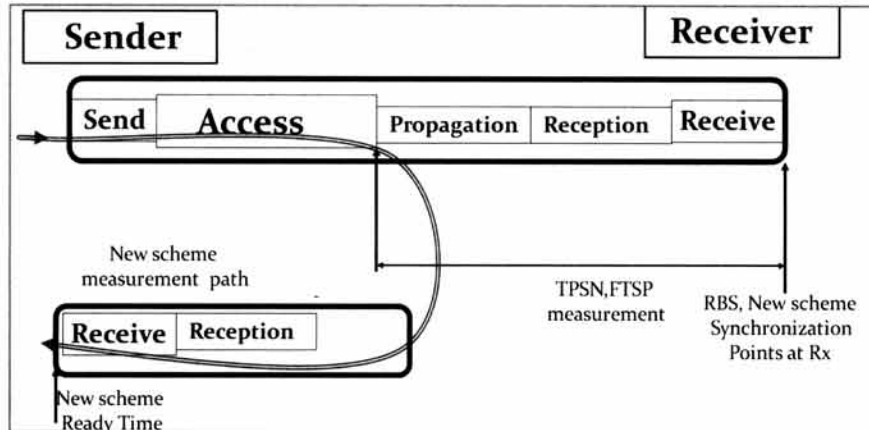
이 논문에서는 WSN에서의 노드간의 시간 동기화 방안을 다룬다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 클럭 동기화 기술과 관련 연구를 살펴본 후, 3장에서 효율적인 새 동기화 방안을 제안한다. 그리고 4장에서 시뮬레이션 시험을 통하여 제안 방안을 검증한 후 마지막으로 5장에서 결론을 내린다.

2. 관련 연구

2.1 지연 시간 분석

전달 지연은 두 가지 관점에서 세부적으로 나눌 수 있다. 첫째, 고정 지연과 가변 지연으로 나누어진다. 또 다른 구분

[†] 정 회 원 : 동양대학교 컴퓨터정보전학과 교수
논문접수 : 2012년 2월 16일
심사완료 : 2012년 3월 19일



(그림 1) 지연 시간의 구성 요소

방법은 송신자로부터 수신자까지 도착하는 동안 지연 시간을 분해하는 것이다. 여기에는 (그림 1)과 같이 송신, 접근, 전송(Transmission), 전파, 접수(Reception), 수신 지연시간으로 나누어진다[4].

송신 지연은 응용 계층에서 메시지를 구성하는데 걸리는 시간으로 가변적이다. 접근 지연은 MAC(Medium Access Control) 계층에 도달한 후 채널에 접근할 때까지 기다리는 지연 시간이다. 접근 지연은 가변적이며 전체 지연 성분 중에서 가장 중요하고 큰 비중을 차지한다. 전송 지연은 메시지를 물리 계층으로 보내는데 걸리는 시간으로 전송 속도가 결정되면 데이터 크기에 의해 결정된다. 전파 지연은 메시지가 무선 채널을 통해서 송신자로부터 수신자까지 전파되는 지연 시간으로 광속에 가까운 전기 전파 속도로 전달되므로 거리에 따라 일정하며 WSN과 같이 가까운 거리에서는 아주 작은 값을 가진다. 접수 지연은 수신자가 하부의 물리 계층으로부터 메시지를 받아들이는 시간으로 송신측의 전송 지연 시간과 유사하다. 지연 시간 중에 전송, 전파, 그리고 접수 지연 시간은 공통적으로 고정 값을 갖는다. 수신 시간은 가변적이며 수신한 메시지를 수신자의 응용 계층으로 전달하는데 필요한 시간으로 송신측의 송신 시간과 유사하다. (그림 1)에서 데이터의 크기가 작은 경우 전송 지연 시간은 상대적으로 크지 않으며 접수 지연은 수신 지연에 포함하여 나타내었다.

2.2 기존 제안 방안

전통적이고 가장 대표적인 시각 동기화 방안은 인터넷에서 개발되어 사용되고 있는 NTP(Network Time Protocol)[2]이다. 하지만 무선 네트워크 특히 무선 센서 네트워크에서는 적합하지 않으므로 새로운 시각 동기화 방안들이 제안되어 왔다. NTP와 TPSN [3]에서는 기본적으로 두 노드간에 일대일로 왕복 지연 시간을 측정하여 클럭 오프셋을 추정하며, 이를 동기화 방식에서 송신자-수신자 동기화로 분류한다. RBS(Reference Broadcast Synchronization)[4]에서는 송신자가 참조 패킷을 방송으로 보내면 여러 수신자가 참조 패킷을 수신한 시간을 서로 교

환하여 시각 오프셋을 기록하는 방법을 사용하므로 수신자-수신자 동기화 형태로 분류되며, 수신자간에 많은 메시지 교환이 필요하다. RBS의 중요한 특징은 송신자에서 발생하는 예측이 어려운 지연 성분을 제거하여 수신자들의 오류를 줄이는 것이다. 즉, 송신자가 방송으로 보낸 참조 패킷의 송신 지연과 접근 시간은 가변적이더라도 모든 수신자에게 공통으로 동일하게 나타나며 전파 지연 시간은 무시할 정도로 작고 각 수신 노드의 수신 지연을 같다고 가정하면 모든 수신자가 거의 동일한 시간에 송신자로부터 참조 패킷을 받는다고 가정하는 것이 타당하다. RBS의 방식은 예측이 어려운 지연 시각 성분을 동기화에서 제외시키므로 수신자간에 동기화 오차를 줄이기는 하지만 송신자의 시각 정보가 수신자에게 전달되지 않으므로 네트워크 전체를 글로벌 시각으로 동기화할 수 없다. FTSP[Flooding Time Synchronization Protocol][5]은 동적으로 결정되는 루트 노드에서 방송을 사용하여 이웃 노드들에게 시각 정보를 전송하여 이를 수신한 노드들이 패킷의 전달 지연을 추정하고 계속해서 다른 노드로 자신의 시각 정보를 순차적으로 전달하여 전체 네트워크의 동기화를 수행한다. FTSP는 시각 기록의 정확도를 높이기 위해 MAC 계층에서 시간을 기록하며 TPSN도 유사한 방법으로 구현된다. MAC 계층에서 프로토콜을 구현하는 것은 시각 측정의 정확도를 높이는 데 우수하지만 동기화 용도의 다른 데이터의 전송에서도 불필요하게 오버헤드가 추가되며 특정 MAC 프로토콜 스택에서만 동작하므로 응용면에서는 유연성이 부족한 단점이 있다.

제안된 여러 방안들은 동작 환경, 구현 환경이 다르므로 직접적인 성능 비교는 쉽지 않다. 무선 센서 네트워크의 디자인에서 가장 주된 고려 사항은 전력 절감이며 동기화 프로토콜도 예외가 아니다. 무선 노드의 에너지 소모에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 통신 장치에서 발생하므로 전송 메시지의 수를 줄이는 것이 에너지 절약에 결정적이다. TPSN와 FTSP가 노드 수에 비례하는 메시지를 전송하는 것과 대조적으로 RBS는 노드수의 제곱에 비례하여 메시지 수가 증가하여 노드 수가 늘어날수록 에너지 소모가 급격히 증가한다.

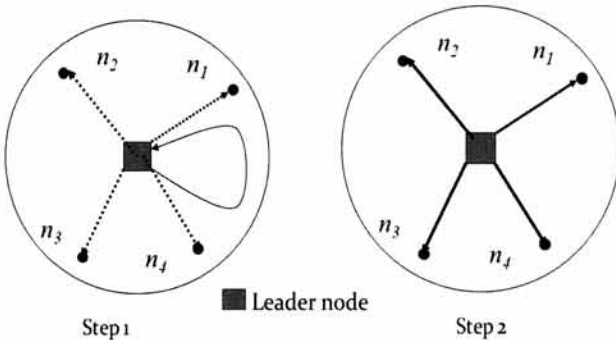
(그림 1)에서 TPSN와 FTSP는 MAC 계층에서 시각 정보를 기록하므로 송신 지연과 접근 지연을 제외한 나머지 지연 시간을 측정하거나 일부 지연 부분을 무시하여 적용한다. RBS에서는 송신측의 지연 성분에 상관없이 수신측에 도착한 시각 정보만이 필요하다.

3. 제안 방안

본 방안은 리더 노드를 선정하여 리더 노드의 시각 정보를 연속적인 2번의 브로드캐스트를 통하여 인접한 노드에게 전달함으로써 단일 전송 영역내에 있는 이웃 노드들을 동시에 동기화한다. 본 방안은 멀티홉에서 동작하며, 단계별로 단일 홉 동기화와 멀티 홉 동기화로 설명하면 다음과 같다.

3.1 단일 홉 동기화

1단계 : 리더 노드가 자신의 로컬 클럭으로 현재 시각을 패킷에 기록한 다음 방송을 통하여 전송이 가능한 범위(전송 영역)내의 모든 노드에게 전달하며, 이것을 준비 패킷(Ready packet)이라고 부른다.



(그림 2) 제안 동기화 방안-기본 동작

준비 패킷은 전송 영역내 모든 노드뿐 아니라 리더 노드 자신에게도 전달이 된다. 리더 노드는 준비 패킷을 수신한 시각을 '준비 시각'으로 기록한다. 이때 송신과 수신이 모두 리더 노드에서 이루어졌으므로 시간 오프셋은 발생하지 않는다. 연속하는 두 패킷 사이의 시간 간격은 대단히 짧으므로 클럭 드리프트는 고려하지 않는다. (그림 1)에서 송신측이 보낸 패킷은 수신측으로 전달되면서 동시에 송신측에서도 수신하여 전체 전달 지연 시간을 측정하는 경로를 나타낸다. 리더 노드를 제외한 다른 노드들은 송신측이 보낸 준비 패킷의 도착 시각을 자신의 로컬 클럭으로 기록하여 자신의 준비 시각으로 간주한다. 그 다음 송신측으로부터 추가로 패킷이 도착하길 기다린다. 송신자의 준비 패킷의 도착 시각과 다른 노드들의 준비 시각은 같은 시각으로 가정한다. 이는 전송 영역 내에 있는 노드들은 가까운 거리에 있으므로 송신자로부터의 전파 지연이 무시할 정도로 작으며, 수신자의 조건이 비슷하여 수신 지연이 동일하다고 가정하면 타당하다.

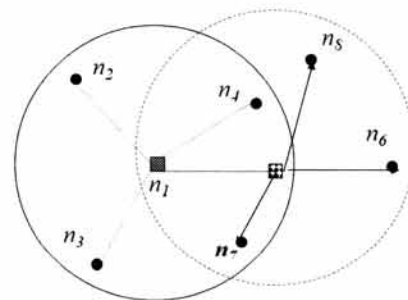
2단계 : 1단계에서 리더 노드가 자신이 보낸 준비 패킷의 도착 시각(준비 시간)을 기록하여 이 값을 패킷에 실어 영역내의 노드들에게 방송한다. 이것을 시작 패킷(Go packet)이라고 부른다. 영역내의 노드들은 리더 노드가 보낸 시작 패킷을 수신하여 리더 노드가 기록한 준비 시각과 각 노드가 1단계에서 기록했던 준비 시각의 차이를 계산하여 송신자와 수신자의 클럭 오프셋 차이를 구한다. 이로부터 로컬 클럭을 조정하거나 상대 노드와 오프셋 표를 유지하여 필요시 시각을 변환하여 사용한다. 이것이 본 방안의 동기화 동작이다.

3단계 : 동기화는 정기적으로 또는 필요시 반복하여 1,2 단계 동작을 실시한다.

3.2 멀티 홉 동기화

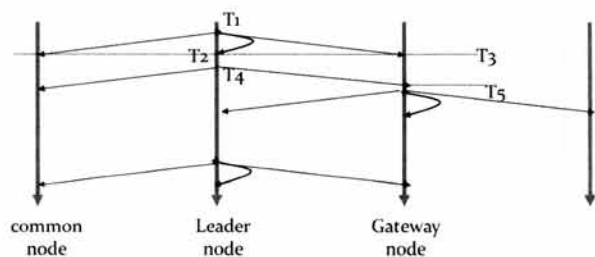
단일 홉 동기화는 방송을 통해 한 번에 전달할 수 있는 영역 내에서만 이루어진다. 이 영역 밖에 위치한 노드와는 직접 메시지를 전송할 수 없고 이 영역과 다른 영역의 중간에 위치한 노드를 통해서 간접적으로 전송한다(게이트웨이 노드). 게이트웨이 노드는 새로운 리더 노드가 되며, 영역내의 한 노드를 게이트웨이 노드로 선정하여 반복적으로 다른 영역의 노드를 동기화시킨다.

본 방안은 멀티홉에서 동작하기 위해 (그림 3)과 같이 클러스트 구조를 구성한다. 홉수를 최소화하거나 에너지 효율을 최대화 하기 위한 알고리즘 등 클러스트를 구성하는 알고리즘은 기존에 많이 제안되어 있다. 본 방안의 핵심은 클러스트 구성이 아니라 동기화 방법에 있으므로 가장 일반적이고 간단한 클러스트 알고리즘을 사용한다.



(그림 3) 제안 동기화 방안-멀티 홉 동작

제안 동기화 방안의 동작을 시간 관계도로 설명하면 (그림 4)과(와) 같다.



(그림 4) 본 동기화 방안의 시간 관계도

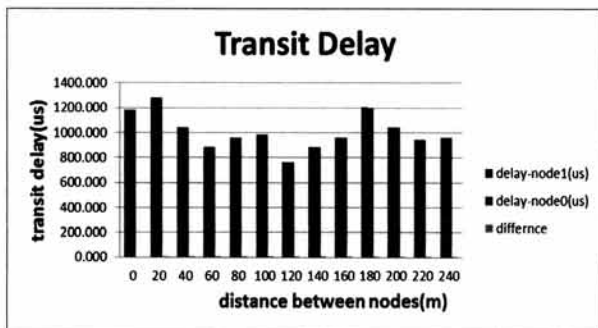
리더 노드에서 T_1 에 준비 패킷을 보내면 자신의 노드에 도착한 시각은 T_2 이고 다른 멤버 노드에 도착한 시각은 T_3 이다. 앞절에서 $T_2 = T_3$ 로 가정하였다. 리더 노드에서는 T_1 과 T_2 로부터 동기화에 필요한 준비 시각을 기록하고 지연 시간을 추정한다. 이 값을 시작 패킷에 실어 멤버 노드들에게 T_4 에 방송한다. 리더 노드를 제외한 모든 멤버 노드는 리더 노드가 보낸 시작 패킷을 T_5 에 받아 클럭 오프셋을 계산하고 동기화한다. 다음 동기화를 마친 노드 중 게이트웨이 노드는 새로운 리더 노드가 되어 앞에서 설명한 기본 동작을 반복한다.

4. 실험 결과

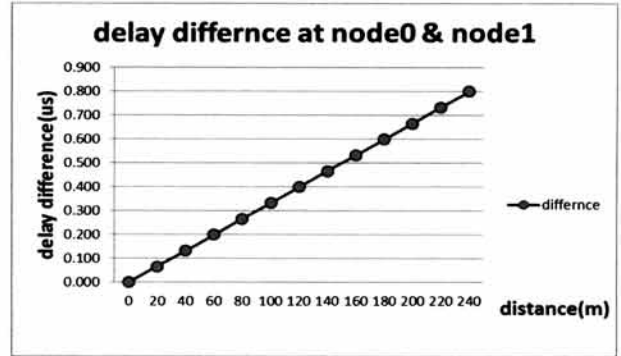
제안한 동기화 프로토콜을 검증하기 위해 NS2 2.34 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 실험하였다. 본 방안은 브로드캐스트를 사용하여 자신이 보낸 패킷의 도착 시간을 측정하며, 현재 NS2 시뮬레이터에는 구현이 되어있지 않다. 그 이유는 대부분의 응용에서 자신이 보낸 패킷을 스스로 수신하는 경우가 거의 없으며 사용하더라도 실제 하위의 물리 계층을 거치지 않고 루프백으로 전송하는 것이 효율적이기 때문으로 생각된다. 즉 브로드캐스트로 전송된 패킷을 수신할 때 패킷을 복사하는 과정에서 자신의 노드로의 전송을 생략하고 있으므로 현재 NS2 코드를 일부 수정하였다. 시뮬레이션 환경은 WSN의 무선 노드를 설정하였으며, 전송 범위는 550m, MAC을 IEEE 802.11로 적용하였다.

4.1 전송 지연 시간 측정

먼저 거리에 따른 패킷의 전송 지연 시간을 측정하였다. 2개의 노드 0과 노드 1을 배치한 후 노드 0에서 방송 패킷을 전송하여 노드 0으로 되돌아오는 패킷과 노드 1에서 수신하는 패킷의 지연 시간을 측정하였다. 그 다음 노드 1을 노드 0으로부터 20m씩 멀어지게 이동하며 측정한 결과는 (그림 5)과(와) 같다. 측정할 때마다 노드 0과 노드 1에서 측정된 지연 시간은 변하지만 두 값의 차이는 노드간 거리에 비례하여 나타난다(그림 6). 이 값은 전파 지연 시간과 수신 지연의 결과로 보인다. 따라서 본 방안에서 전송 범위 내에 위치한 노드 간의 지연 시간은 작은 값을 가지며 전파 지연시간은 무시할 정도로 작다는 가정은 타당하다.



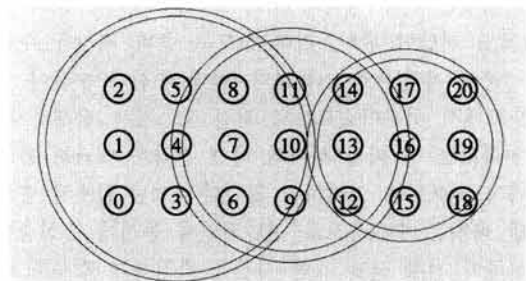
(그림 5) 노드간 거리에 따른 전송 지연 시간



(그림 6) 노드0와 노드1의 전송 지연 시간 차이

4.2 전송 메시지 횟수

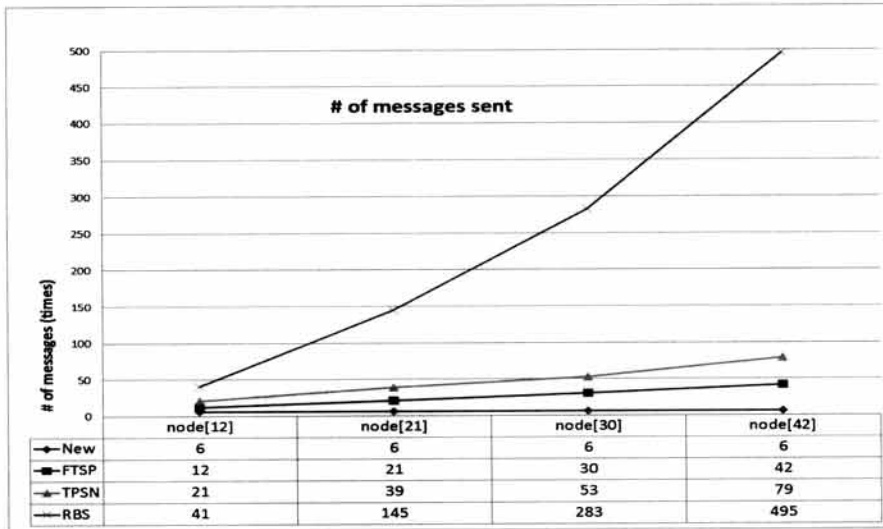
WSN에서 노드가 통신할 때 소모되는 에너지는 프로세서 처리시의 에너지 소모보다 훨씬 크므로 전송 메시지의 수는 전력 소모에 커다란 영향을 끼친다. 동일한 성능의 동기화 프로토콜이라면 전송 메시지 수가 적은 것이 전력면에서 더 효율적이다. 노드의 배치는 (그림 7)과(와) 같이 21개의 노드를 3개의 홉으로 구성하고 방송되는 메시지의 수를 측정하였다. 결과는 각 홉당 2회의 방송 메시지가 발송되므로 총 6개의 메시지가 소요된다. 3홉을 유지한채 노드의 수를 2배로 늘려 밀도를 높인 시나리오에서 측정한 결과도 동일하게 6개의 메시지가 소요되었다. FTSP 방식으로 측정한 결과는 각각 21회와 42회로, 노드의 수와 동일하다. TPSN은 재전송으로 인한 추가 메시지 전송이 발생하였다. RBS는 단일 홉에서 동작하며, 각 홉에서 각각 전송된 메시지 수를 합산하였다. 메시지 수 면에서 FTSP와 TPSN은 노드 수에 비례하고 RBN이 노드수의 제곱에 비례한 것과 달리 본 방안은 노드수에 상관없이 홉당 2개의 메시지 전송만으로 동기화를 수행하므로 노드 수가 많을 때에도 우수한 성능을 나타낸다. 즉 확장성이 우수함을 알 수 있다.



(그림 7) 시뮬레이션 토폴로지

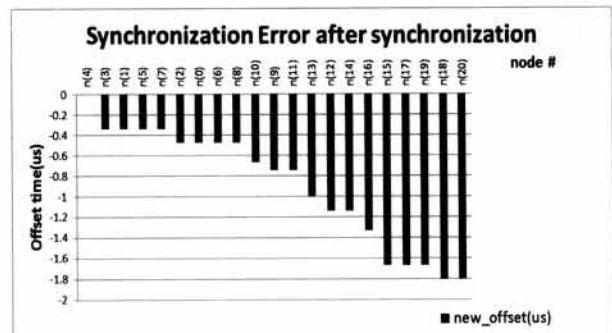
4.3 동기화 오류

(그림 7)과(와) 같이 21개의 노드를 배치하였으며 4,10,16 노드를 리더 노드로, 이 중 노드 4를 루트 노드로 설정하였다. (그림 9)는(은) 루트 노드(노드 4)를 기준으로(0) 각 노드의 현재 시각을 0~100us사이의 값으로 uniform하게 무작위로 설정하여 비동기 상태를 설정한 후 동기화를 수행한 결과이다. 동기화 프로토콜의 정확도는 절대 정확도와 상대

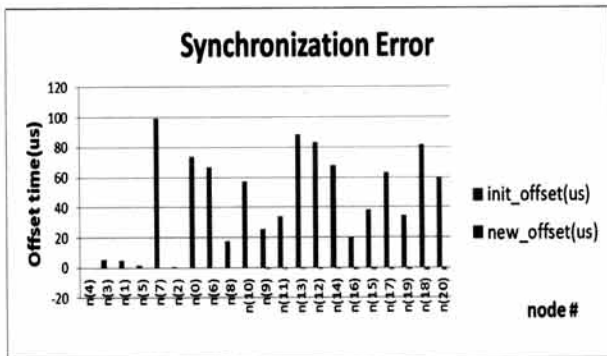


(그림 8) 각 동기화 방안의 메시지 수 비교

정확도로 구분하여 나타낼 수 있다[7]. 절대 정확도는 외부의 글로벌 클럭과 노드의 클럭과의 차이를 말하고, 상대 정확도는 네트워크내의 노드간의 클럭 오프셋을 말한다. 본 방안은 글로벌 클럭으로 네트워크 전체를 동기화하는 외부 동기화 방안이므로 절대 정확도를 나타내면, 동기화 이전의 동기화 오류의 RMSE(Root Mean Square Error)가 54.3us이고 동기화 후에는 1.0us으로 감소하였다.



(그림 10) 본 방안의 동기화 오류 정확도



(그림 9) 동기화 전후의 동기화 오류

(그림 9)에서 동기화 후에 측정된 동기화 오류값은 초기 비동기 상태에 비하여 상대적으로 작은 값이어서 그림에서 잘 나타나지 않으므로 동기화 후 오류 부분만을 확대해서 다시 나타내면 (그림 10)과(와) 같다. 루트 노드로부터 1홉 거리에 있는 노드 0~11까지는 거의 동일한 값으로 나타나며, 다음 게이트웨이 역할을 하는 노드 10에서 다시 브로드캐스트를 통해서 노드 12,13,14,16으로 전달되는 과정에서 발생하는 오차와 루트 노드와의 오차가 더해져서 나타난다. 마찬가지로 게이트웨이 노드 16을 통해서 노드 15,17,18,19,20으로 브로드캐스트가 전달되며 오류는 누적된다.

본 방안과 대표적인 기존 방안과의 성능 비교는 동작 환경이 서로 다르므로 직접 하기가 어렵다. TPSN과 FTP는

MAC 계층과 특정 하드웨어에서 동작하므로 MAC보다 상위 계층에서 동작하는 본 방안과는 다르다. 또한 RBS와 TPSN은 기본적으로 단일 홉에서 동작하므로 멀티홉에서 동작하는 FTSP나 본 방안과 서로 다르다. 참고 문헌을 통하여 타 방식의 정확도 시험 결과를 살펴보면, RBS와 TPSN은 동기화 오류가 약 10us에서 30us 범위에 있고, FTSP의 경우는 단일 홉에서 1.5us로 나타났다. 이와 비교할 때 본 방안의 시뮬레이션 결과는 3개의 홉에 대하여 홉당 평균 0.35us로 나타났다.

5. 결론

WSN에서 클럭 동기화는 정확한 시간 정보가 요구되는 응용에서 중요하며, 무선 통신망 특히 WSN에서의 클럭 동기화는 유선 통신망에서와 달리 전력 소모와 신호 전달 손실 등의 요구 사항이 필요하다. 이 논문에서는 WSN에서의 노드간의 시각 동기화 방안을 제안하였다. 이 방안의 특징은 연속적인 두번의 방송을 통해서 송신자와 수신자간에 정확한 동기화 시점을 파악하고 글로벌 시각을 전달하여 멀티홉 네트워크를 동기화할 수 있다. 제안한 방안은 단일 홉에

서 2번 방송 패킷만으로 전체 노드들을 동기화시키므로 기존에 제안된 다른 동기화 방안보다 메시지 교환 횟수를 줄여 전력 소모를 크게 줄였다. 또한 노드의 밀도가 증가하더라도 단일 홉 내에서 사용되는 메시지 수가 일정하므로 밀집 네트워크에서 우수한 성능을 나타낸다. 시뮬레이션 시험을 통하여 제안 방안의 타당성을 검증하고 타 방안과 비교할 때 에너지 효율적이면서 기존의 방안보다 성능이 우수함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] B. Sundararaman, et al., "Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey", ELSEVIER Ad-hoc Networks 3, pp.281-323, 2005.

[2] D. Mills, "Computer Network Time Synchronization" Second Edition.

[3] S. Ganeriwal et al, "Timing-Synch Protocol for Sensor Networks", ACM Sensys, USA, 2003.

[4] J Elson et al, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts". ACM OSDI, Dec., 2002.

[5] M. Maroti et al, "The Flooding Time Synchronization Protocol", proc. of SenSys'04, USA, 2004.

[6] P. Ranganathan et al, "TIME SYNCHRONIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS: A SURVEY", Int. J of Ubicom, Apr., 2010.

[7] S. Rahamatkar et al, "Analysis and Comparative Study of Clock Synchronization Schemes in Wireless Sensor Networks", Int. Journal on Computer Science and Engineering Vol.02, No.03, 2010.



배 시 규

e-mail : skbae@dyu.ac.kr
 1993년 경북대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1998년 경북대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1995년~현 재 동양대학교 컴퓨터정보 전학과 교수

관심분야: 컴퓨터네트워크, WSN 등