

비동기식 스케줄링 기반 센서 네트워크를 위한 반응형 클록 동기화 기법

이상훈⁰ 최린

고려대학교 전기전자전파공학부

smile97@korea.ac.kr, lchoi@korea.ac.kr

Reactive Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks with Asynchronous Wakeup Scheduling

Sang Hoon Lee⁰ Lynn Choi

School of Electrical Engineering, Korea University

1. 서 론

센서 네트워크를 위한 기존의 모든 클록 동기화 알고리즘들은 [2, 4, 5, 6, 7] 임의의 노드가 언제든지 시간 정보를 사용할 수 있다고 가정하므로 클록 정확도를 특정 임계치 내로 유지하기 위해 주기적으로 동기화를 수행한다. 이들은 시간 정보의 사용과 관계없이 미리 동기화를 수행하므로 선행적 기법으로 분류할 수 있다. 이는 클록 정확도를 일정 수준 내로 유지할 수 있으므로, 각 노드가 이웃과 동작 스케줄을 공유하는 동기식 스케줄링 기반 네트워크와 같이 시간 정보를 사용하는 빈도가 높은 환경에 적합하다. 그런데, 각 노드가 독립적인 동작 스케줄을 가지는 비동기식 스케줄링 기반 네트워크 환경에서는 시간 정보가 이벤트 발생에 따른 데이터 처리와 같이 제한된 상황에서만 사용되므로 동기식 스케줄링 환경에 비해 낮은 빈도로 시간 정보를 사용한다. 특히, 이벤트 처리와 관련된 시간 정보는 데이터를 생성한 소스 노드와 이를 처리하는 목적지 노드에서만 사용되는데, 이는 소스 및 목적지 노드만 서로의 클록을 동기화할 필요가 있음을 뜻한다. 그러므로 비동기식 스케줄링 환경에서는 데이터 전송에 참여하지 않는 노드들은 동기화 과정을 수행할 필요가 없음을 뜻한다. 따라서 본 논문에서는 필요할 때에만 클록 동기화를 수행할 수 있는 반응형 클록 동기화(RCS: reactive clock synchronization) 기법을 제안한다. 동기화 과정을 데이터 통신 과정에 내장함으로써 트래픽이 발생할 때에만 동기화가 수행되도록 하는 것이 RCS의 핵심이다. 이를 통해 선행적 기법이 가지는 불필요한 클록 동기화 수행에 따른 에너지 및 대역폭 낭비 문제를 효과적으로 해결할 수 있도록 한다.

2. 본 론

데이터에는 이벤트 감지 시간과 같은 시간 정보가 포함될 수 있다. 목적지 노드가 이 시간 정보를 사용하기 위해서는 소스 및 목적지 노드가 기준 시간을 공유해야 한다. 하지만 목적지 노드가 소스와 자신의 클록 간의 오차를 계산할 수 있다면, 별도의 기준 시간 공유 없이 목적지 노드가 데이터에 포함된 시간 정보를 자신의 시간에 맞추어 변환하여 사용할 수도 있다. 직관적으로 볼 때, 소스 및 목적지 노드의 클록 오차는 두 노드 사이의 패킷 전송 경로 상에 위치하는 각 노드들의 클록 오차들의 합과 같다. RCS는 기본적으로 오차 및 지연 추산 방식[7]을 사용한다. 두 노드가 데이터 통신을 수행할 때, 각 노드는 각 패킷 헤더에 시간 정보를 삽입하는데, 이 때, 송신 노드는 수신 노드와의 패킷 교환 과정을 통해 획득한 시간 정보를 바탕으로 수신 노드와의 클록 오차를 계산한다. 송신 노드는 계산된 오차와 데이터 전송 경로 상의 이전 노드와의 오차를 더하여 소스 노드로부터의 누적 오차를 계산하고 이를 수신 노드에게 알려준다. 이를 통해 수신 노드는 소스 노드로부터 자신까지의 누적 클록 오차를 계산할 수 있다. 이 과정을 통해 추산된 클록 오차는 데이터 통신 직전에 수행되므로 목적지 노드는 최신의 시간 정보를 이용할 수 있다. 그러므로 RCS는 선행형 클록 동기화 기법에서 발생하는 시간의 흐름에 따른 클록 에러 증가 문제를 최소화할 수 있다.

누적 클럭 오차 계산을 위해 RCS는 세 번의 패킷 전송을 필요로 한다. 그 중 앞선 두 번은 클럭 오차를 계산하는 데 필요하고 나머지 한 번은 계산된 오차를 전송하는 데 필요하다. 이 때, 클럭 동기화에 요구되는 세 번의 패킷 전송은 센서 노드가 사용하는 비동기식 스케줄링의 방식에 따라 구현 방식이 달라질 수 있다. 먼저, B-MAC[8] 혹은 WiseMAC[3]과 같이 프리앰블-데이터-응답 순서에 따르는 방식에서는 프리앰블은 별도의 정보를 포함하지 않고, 송신 노드는 프리앰블 전송 후 곧바로 데이터를 전송하므로 양방향 패킷 교환을 필요로 하는 오차 및 지연 추산 과정에 프리앰블을 사용할 수 없다. 그러므로 데이터 및 응답 패킷을 이용하여 오차를 계산하고, 계산된 오차를 전송하기 위해 클럭 패킷(clock packet)이라 불리는 별도의 패킷을 이용한다. 다음으로 X-MAC[1]과 같이 프리앰블-응답-데이터 순서에 따르는 방식에서는 프리앰블이 수신 노드 주소를 포함하고, 프리앰블 전송 후 응답 패킷을 교환하므로 별도의 추가적인 패킷 없이도 RCS를 데이터 통신 과정에 내장할 수 있다.

계산된 클럭 오차는 노드의 상대적인 클럭 오차가 미리 지정된 임계치보다 커지기 전까지는 유효할 것이다. 만약 트래픽이 집중적으로 발생한다면 단시간에 다수의 데이터 패킷이 전송될 것이므로 일정 시간 동안은 계산된 클럭 오차를 재사용할 수 있다. 이처럼 이전에 계산된 오차를 재사용할 수 있는 기간을 만기 시간이라고 하며, 만기 시간 이내에 통신이 발생할 때에는 송신 노드는 이전의 클럭 오차 정보를 재사용한다. 이와 같은 방법은 트래픽이 집중될 때에 클럭 동기화 횟수를 줄일 수 있도록 한다.

3. 결론

본 논문에서는 최초의 반응형 클럭 동기화 방식으로 RCS라고 불리는 새로운 기법을 제안한다. RCS는 트래픽이 발생한 경우에만 소스 노드가 클럭 동기화 과정을 시작한다는 점에서 기존의 방식들과 근본적인 차이를 보인다. 이는 주기적인 동기화 과정에서 발생하는 오버헤드를 제거할 수 있도록 한다. 또한 만기 시간을 사용함으로써 트래픽이 집중된 경우에 RCS는 클럭 정확도를 유지하면서 에너지 소비량을 더욱 줄일 수 있다. 제안된 방식이 효과적으로 에너지 소비량을 줄일 수 있음을 검증하기 위해 RCS와 더불어 대표적인 클럭 동기화 기법인 TPSN[5] 및 FTSP[6]의 성능을 패킷 수준의 시뮬레이터를 이용하여 평가하였다. 결과에 따르면, 트래픽이 드문 경우 RCS는 기존의 기법에 비해 1% 미만의 에너지를 소비하였다. 이와 더불어 RCS는 TPSN과 FTSP에 비해 각각 36.5% 및 75.8%의 정확도 개선을 보였다. RCS가 기존의 기법들에 비해 정확한 클럭을 제공할 수 있는 것은 시간 정보가 사용되기 직전에 클럭 동기화를 수행하기 때문에 시간 흐름에 따른 오차 발생이 작기 때문이다.

참고 문헌

- [1] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks," in *SenSys 2006*, pp. 307-320.
- [2] F. Cristian, "Probabilistic Clock Synchronization," *Distributed Computing*, Vol. 3, pp. 146-158, 1989.
- [3] A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks," in *ALGOSENSORS 2004*, Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3121, pp. 18-31, July 2004.
- [4] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," in *OSDI 2002*, Vol 36, pp. 147-163, 2002.
- [5] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync Protocol for Sensor Networks," in *Proceedings of the SenSys*, pp. 138 ~ 149, 2003.
- [6] M. Maróti, B. Kusy, G. Simon, and Á. Lédeczi, "The Flooding Time Synchronizatoion Protocol," in *SenSys 2004*, pp. 39 ~ 49, 2004.
- [7] D. L. Mills, "Internet Time Synchronization: the Network Time Protocol," *IEEE Transactions on Communications*, Vol 39, No 10, pp. 1482-1493, Oct. 1991.
- [8] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," in *SenSys 2004*, pp. 95-107.