

멀티홉 네트워크 환경에서 모든 노드의 시간 동기화 설정시간 감소 방법

허준기*, 노병희^o

A Reduction Method of Synchronization Setup Times of Whole Nodes In Multihop Network Environments

Jun-ki Heo*, Byeong-hee Roh^o

요 약

최근의 멀티홉 네트워크에 적용되는 릴레이 노드는 단순한 신호 증폭기 역할뿐만 아니라, 주변 신호의 취득, 처리, 그리고 전송하는 역할을 담당한다. 또한, 네트워크 구성 노드들의 협력을 통한 데이터 퓨전 그리고 운용 전력 감소를 위한 전력 스케줄링을 수행하고 있다. 이러한 동작을 위하여, 노드간의 시간동기화는 매우 필요하다. 기존의 멀티홉 네트워크를 위한 시간동기화 방법들은 근접 노드들간 순서대로 시간동기화 과정을 주기적으로 반복하는 1 대 1 시간동기화 구조를 기반으로 한다. 이 방법들은 노드 수가 증가할수록, 노드들간 동일한 시간동기화 메시지의 반복 전송으로 인한 시간동기화 설정시간이 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 노드들이 유선으로 직렬 연결된 멀티홉 네트워크 환경에서 시간동기화 설정시간 감소를 위한 브로드캐스트 시간동기화 방법을 제안한다. 실험결과 제안방법은 IEEE 1588에 비해 노드 수 증가 조건에서 약 8%, 노드간 처리지연시간 증가 조건에서 약 14%의 동기화 설정시간 감소를 확인할 수 있었다.

Key Words : Multi Hop Network, Relay Node, Time Synchronization, IEEE1588, RBS

ABSTRACT

Recently, multi-hop network relay nodes can not only operate as simple amplifiers, but also acquire, process, and transmit neighboring signals. In addition, the nodes provides the scheduling for energy saving and data fusion by collaborating with other nodes. For those operations of nodes, the time synchronization among nodes is very necessary function. The time synchronization methods for multi-hop networks in previous works have been based on the one-to-one time synchronization scheme, which periodically repeats the synchronization process between neighbor nodes in a serial manner. The methods have the basic problem that the setup time for the time synchronization increases as the number of nodes increases due to the redundant transmissions of time synchronization messages between nodes. This paper proposes a broadcast time synchronization method to reduce the time synchronization setup time in multi-hop networks with nodes connected serially. Experimental results show that the synchronization setup time is reduced by 8% in the node number increase condition and 16% in the node to node processing delay time increase condition, compared to IEEE 1588 through the broadcast time synchronization mechanism.

* First Author : (ORCID:0000-0002-4731-3034)LIG Nex1 Co., Ltd., junki.heo@lignex1.com, 정회원

^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-2509-4210) Depr. of Computer Engineering, Ajou University, bhroh@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201808-262-A-RN, Received August 28, 2018; Revised November 6, 2018; Accepted November 12, 2018

I. 서 론

멀티홉 네트워크 (Multi hop Network)는 송신단과 수신단 사이에 다수 개의 릴레이 노드를 이용하여 데이터 통신을 수행하는 네트워크 방식으로 통신 범위 확대를 위한 추가적인 회선 증설이 필요하지 않아 비용 절감 측면에서 이점이 있고 릴레이 노드를 이용하여 데이터를 전송하므로 데이터 전송에 필요한 소비 전력을 줄일 수 있는 장점이 있다.^[1] 릴레이 노드의 신호 전달 방법으로는 아날로그 릴레이 방식에 해당하는 증폭-후-전달 (Amplifier-and-Forward) 방식, 디지털 릴레이 방식에 해당하는 복호-후-전달 (Decode-and-Forward) 방식, 그리고 압축-후-전달 (Compress-and-Forward) 방식이 있다. 증폭-후-전달 방식은 별도의 신호 처리 과정이 필요하지 않아 릴레이 구현 단가가 낮고 전파 지연만 존재하는 이점이 있다.^[2,3] 최근에는 릴레이 노드가 단순히 데이터 전송을 위한 신호 중계기 역할에서 벗어나, 복호-후-전달 방식을 적용하여 주변의 신호를 취득 및 처리하고 전송하는 센서로서의 역할과 무선 환경에서 하나의 기지국 역할을 수행하여 셀 범위를 확대시키는 역할을 할 수 있도록 하는 추세이다.^[4,5]

시간동기화 설정 시간은 네트워크를 구성하는 전체 노드의 마스터 클럭이 동기화가 되는데 소요되는 시간으로 정의된다. 노드가 센서 및 기지국의 역할을 수행할 경우 시간동기화는 데이터 융합 (Data Fusion)과 네트워크 운용 전력 감소를 위한 전력 스케줄링을 위해서 꼭 필요하며 만약 노드간 시간동기화가 되지 않을 경우 취득 데이터의 잘못된 시간 정보로 데이터 퓨전의 오류를 범할 수 있으며 노드의 sleep 모드(센서의 전원 OFF를 수행하는 기능)전환 시 시간동기화 오차로 센서 전원이 켜지는 문제가 발생할 수 있다.^[6]

노드간의 시간동기화 제약 사항은 물리적인 매체에 의해 발생하는 전파 지연과 신호의 송신 시간, 접속 시간 그리고 수신 시간에 의해 발생하는 처리 지연이 있다.^[7,8,20] 특히 멀티홉 네트워크에서는 송신단과 수신단 사이에 릴레이 노드가 존재하는 구조로 데이터의 수신 및 처리를 위한 처리 지연은 더욱 증가하게 된다.^[9]

멀티홉 네트워크의 시간동기화를 위해 Sender - Receiver 방식인 IEEE 1588 (Precision Time Protocol)^[10]이 있으며 이는 마스터 노드가 전송하는 Sync 메시지와 Follow 메시지를 이용하여 마스터 노드와 슬레이브 노드간의 동기오차를 보상하는 방법으로 동기화를 위한 전용 칩을 적용할 경우 μ s

(micro-second) 수준의 동기 정밀도를 보증한다.^[11,12] 하지만 마스터와 슬레이브 노드들간 1대1 시간동기화 후 다음 노드와의 시간동기화가 진행되므로 노드 수가 늘어날수록 초기 Sync 및 Follow 메시지의 중복으로 인해 시간동기화 설정 시간은 커지게 된다.

시간동기화 설정시간 감소를 위해 Receiver - Receiver 방식인 RBS (Reference Broadcast Synchronization)가 제안되었다^[11]. 이는 공기의 빠른 전파전달 속도($3 \times 10^8 m/s$)를 이용하여 마스터 노드에서 슬레이브 노드로 시간정보를 브로드캐스트 (broadcast) 하는 시간동기화 방법이다. 이 방법은 One-way 방식 적용을 통한 동기화 설정시간 감소 효과는 있으나 수중환경처럼 전파전달 속도가 상대적으로 느린 환경에서 운용 시 물의 전파전달 속도 ($1500 m/s$)에 따른 시간동기화 오차 증가 문제와 마스터 노드에서 전송되는 송신전력에 따라 시간동기화 네트워크 범위가 제안되는 문제가 있다.^[10]

본 논문에서는 수중에 노드들이 유선으로 직렬 연결된 멀티홉 네트워크 환경에서 시간동기화 설정시간 감소를 위한 브로드캐스트 시간동기화 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 RBS의 장점인 브로드캐스트 명령 전송 기능을 적용하여 시간동기화 설정시간을 감소시키고, IEEE 1588의 시간동기화 메커니즘을 응용하여 네트워크 범위의 제한 없이 노드간의 시간동기화가 가능하도록 하는 Sender-Receiver 방식과 Receiver-Receiver 방식의 복합구조를 갖는다. 제안 방법의 검증에 위한 시뮬레이터를 제작하여, 성능검증을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 멀티홉 네트워크 구조 및 시간동기화 오류 요소 등 관련연구를 소개한다. III장에서는 제안하는 방법을 기술하고, IV장에서는 제안 방법의 성능 실험 결과를 보인다. 마지막으로 제V장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 관련 연구

2.1 멀티홉 네트워크

멀티홉 네트워크는 시스템의 송신단과 수신단 사이에 한 개 또는 다수 개의 릴레이 노드를 이용하여 전송 신뢰도를 높이거나 다중화 이득을 확보함으로써 대역 효율성을 높이는 네트워크를 말한다.^[1]

그림 1과 같이 직렬연결 구조를 갖는 멀티홉 네트워크에서는 송신 노드에서 전송한 신호가 중간에 릴레이 노드들을 거쳐서 목적지 노드까지 전송된다. 거

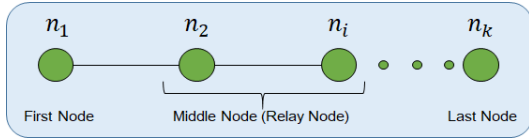


그림 1. 직렬연결 구조의 멀티홉 네트워크
Fig. 1. Multi-hop network with serial connection structure

리에 따른 경로 손실을 보상할 수 있으며 목적지 노드 까지의 존재하는 다수 릴레이 노드가 단순히 신호의 증폭 역할에서 벗어나 기간망과 결합하여 통신범위 및 용량 확대와 센서로서의 역할 수행 등 다양한 형태로 발전해 가고 있다.^[1,4]

릴레이 노드가 신호를 전달하는 방법은 증폭-후전달 방식, 복호-후전달 방식 그리고 압축-후전달 방식으로 구분된다.^[2] 증폭-후전달 방식은 단순 신호의 증폭 형태로 릴레이 노드의 구현단가가 낮은 장점이 있지만, 다른 기능 수행에 제약이 있으며 복호-후전달 방식과 압축-후전달 방식은 수신프레임의 처리 및 재결합하는 구조로 릴레이 노드에 다양한 기능을 부여할 수 있으나 신호전송에 있어 신호처리에 따른 시간 지연이 발생하는 단점이 있다.^[16,17,19]

멀티홉 네트워크는 최근 센서 네트워크, 멀티미디어 서비스를 위한 홉 네트워크, 메시 네트워크, 이동 멀티홉 릴레이 네트워크 (Mobile Multi-hop Relay; MDR) 등에 응용되고 있다. 특히 멀티홉 네트워크 구조를 이용하여 다수 노드를 직렬연결하고 노드에 주변을 감시할 수 있는 센서를 연동하여 광범위 영역의 수중 감시 정찰에 응용되고 있다.^[4,5]

2.2 IEEE 1588(Precision Time Protocol)

IEEE 1588^[10]은 임베디드 시스템의 고정밀 시간동기 기능 구현을 위한 국제 표준으로 전용 칩 사용 할 경우 μs 수준의 동기정밀도를 제공한다. IEEE 1588은 Sender-Receiver 동기화 방식으로 기준 시간 제공 노드를 마스터(master) 노드라고 하며 상대 노드는 슬레이브(slave) 노드라고 한다.

그림 2는 IEEE 1588에서의 마스터 노드의 시간에 슬레이브 노드의 시간을 동기화하기 위한 메시지 교환 과정을 보여준다. 시간 동기화를 위하여 Phase 1과 Phase 2의 두 단계가 순차적으로 수행된다. Phase 1에서는 시간차(Offset)를 추정하게 되며, Phase 2에서는 마스터 노드의 송신시간에서 부터 슬레이브 노드의 수신시간의 지연(D)을 추정하게 된다.^[10,11,15]

Phase 1의 시간차 추정을 위하여 마스터 노드는 슬레이브 노드로 'Sync' 메시지를 전송한다. 이때 마스

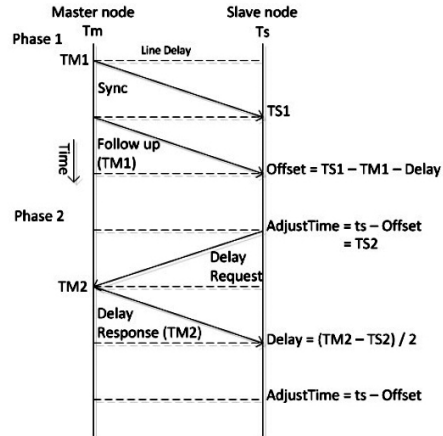


그림 2. IEEE1588의 메시지 교환과정[10]
Fig. 2. IEEE 1588 message exchange process[10]

터 노드는 Sync 메시지 전송 시점 (TM1)의 timestamp를 측정하고, 슬레이브 노드는 Sync 메시지 수신 시점 (TS1)의 timestamp를 측정한다. 이어서 마스터 노드는 Follow up 메시지에 TM1을 포함하여 슬레이브 노드에 전송하며 슬레이브 노드는 Follow up 메시지 수신 후 식 (1)에 따라 마스터 노드와 슬레이브 노드사이의 시간차인 Offset을 계산한다. 이때 D는 timestamp의 초기값인 '0'을 적용한다.

$$Offset = TS1 - TM1 - D \quad (1)$$

Phase 2의 지연 추정을 위하여, 식 (1)에서 계산된 Offset 및 슬레이브 노드의 현재 timestamp 값 (Ts)을 이용하여, 식 (2)에 보인 바와 같이 1차 보정 결과 값인 TS2를 계산한다.

$$TS2 = Ts - Offset \quad (2)$$

왕복 시간 (round trip time, RTT) 측정을 위해 슬레이브 노드는 마스터 노드에게 지연 Request 메시지를 송신한다. 마스터 노드는 Request 메시지 수신 시점 (TM2)의 timestamp를 측정 후, 슬레이브 노드에게 지연 Response 메시지에 TM2를 포함하여 전송한다.

슬레이브 노드는 지연 Response 명령 수신 시, 식 (3)에 따라 단 방향 지연의 평균을 계산하고 식 (1)을 이용하여 Offset을 재계산한다. 그리고 최종으로 보정된 timestamp 값인 AdjustTime을 식(4)에 의하여 구한다.

$$D = (TM2 - TS2) / 2 \quad (3)$$

$$AdjustTime = T_s - Offset \quad (4)$$

IEEE 1588은 위 과정을 통해서 마스터 노드와 슬레이브 노드간 시간동기화가 수행된다. 하지만 마스터 노드에서 Follow up 메시지 및 지연 Response 메시지 전송 시 송신 시간 지연의 영향은 배제되었으며 다수 노드의 시간동기화를 위해서는 위 과정을 주기적으로 반복해야 하므로 지연 설정시간 감소를 위한 개선이 필요하다.

2.3 RBS(Reference Broadcast Synchronization)

RBS 동기화 방식은 Receiver-Receiver 동기화 방식으로 시간동기화의 기준이 되는 비콘 (beacon) 노드가 이웃 노드들에게 동기신호를 브로드캐스트하여 동기화하는 방식이다.^[14] 그림 3에는 전통적인 동기화 방식과 RBS 동기화 방식간의 시간동기화를 위한 경로를 비교하여 나타내었다.

그림 3의 (a)의 전통적인 방식은 비콘 노드에서 송신 시간 지연과 접속 시간 지연의 발생으로 최상경로의 길이가 길다. 반면에 그림 3의 (b)의 RBS방식은 수신 노드간의 동기화를 목적으로 하므로 최상경로 길이는 상대적으로 짧다. 또한 비콘 노드의 동기 신호는 물리적인 신호로 구성되므로 timestamp를 포함하지 않는 것이 장점이다.^[7,13] 그러나 기준 시간을 제공하는 마스터 노드와 정확한 시간동기화는 어려우며

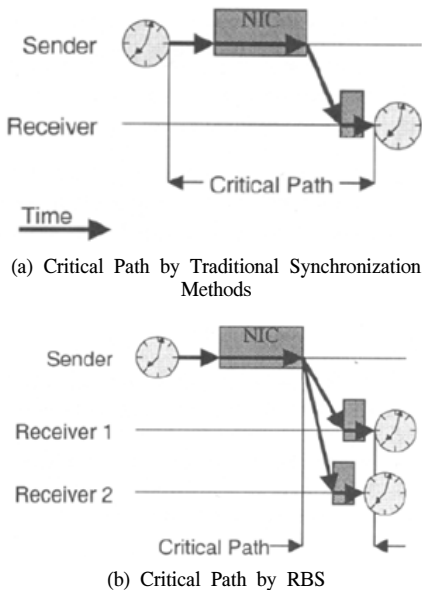


그림 3. 전통적인 동기화 방식과 RBS방식의 Critical Path 비교[6]
Fig. 3. Comparison of traditional synchronization to RBS[6]

비콘 노드에서 송신 전력에 따라 수신 노드의 범위가 제한적이며 전파지연을 배제하므로 육상의 무선 네트워크에서는 동기오차가 적을 수 있으나 유선네트워크 및 수중네트워크에서는 상대적으로 긴 전파지연으로 인해 동기오차 발생할 수 있는 단점이 있다.^[18,19]

III. 제안하는 브로드캐스트 시간동기화 방법

3.1 시스템 모델

3.1.1 멀티홉 네트워크 구성 정의

본 논문에서는 그림 1과 같이 수중에서 유선으로 n_1, \dots, n_k 의 k개 노드들이 직렬로 연결된 멀티홉 네트워크 환경을 고려한다. 시간동기화를 수행하기 전에 데이터가 전송되는 경로는 결정된 것으로 가정한다. 데이터 프레임 전송은 최초 노드 n_1 에서 종단 노드 n_k 까지 여러 개의 중간 노드 n_i 를 거쳐 전송되는 구조를 가지고 있다.

브로드캐스트 시간동기화 메커니즘의 각 노드 기능은 송신단은 시간동기화를 위한 초기 제어명령 전송 및 시간동기화 과정에서 생성된 데이터의 최종 수신하는 마스터 노드(Master Node)의 역할을 수행하고 수신단은 제어 명령의 마지막 수신 노드로 자신이 마지막 노드임을 알고 있으며 따라서 다음 노드로 데이터의 전송을 하지 않는다. 그리고 중간 노드는 앞 노드에서 수신한 제어 프레임 종류에 따라 앞 노드 또는 뒤 노드로 제어 및 데이터 프레임을 전송하는 역할을 수행한다.

3.1.2 지연시간 정의

그림 4에는 노드 n_i 와 이와 직접 연결된 노드 n_j ($=n_{i+1}$)간 양방향 전송에서 발생하는 지연들을 도식화 하여 나타내었다

그림 4에 보인 지연시간 변수들의 구체적인 정의를 표 1에 나타내었다.

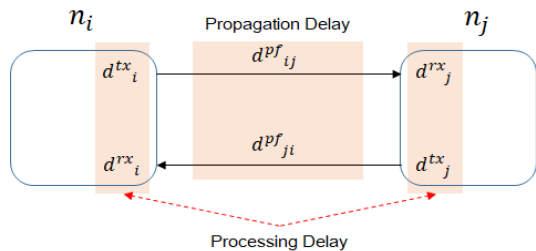


그림 4. 노드간 전파 지연 및 처리 지연
Fig. 4. Inter-node propagation delay and processing delay

표 1. 멀티홉 네트워크 지연시간 변수정의
Table 1. Multi-hop network latency variable definition

구분	변수	의미
Propagation Delay	d_{ij}^{pf}	propagation delay from n_i to n_j
	d_{ji}^{pf}	propagation delay from n_j to n_i
Processing Delay	d_i^{rx}	Data frame receive time at n_i
	d_i^{tx}	Control frame transmission time at n_i
	d_j^{tx}	Data frame transmission time at n_j
	d_j^{rx}	Data frame receive time at n_j

본 논문에서 고려하는 멀티홉 네트워크에 속한 노드들은 유선으로 직렬로 연결된 환경을 고려하므로, 시간동기화 전에 각 노드들은 이동 없는 고정노드이고 동일한 데이터 처리시간을 보유하고 노드간의 상향 및 하향 전송매체는 동일한 가정이 성립된다. 이는 지연 측정 명령 시 RTT의 평균값 산출에 필요한 가정이다. 전파 지연은 전송 매체의 Velocity Factor에 영향을 받으므로 상향과 하향의 전송 매체가 동일할 경우 전파 지연은 동일하다. 이와 같이 전송거리가 일정할 경우 노드간의 지연시간은 동일하게 유지된다.^[20] 따라서 지연 변수는 아래의 식 (5), (6), (7)이 성립한다.

$$d_{ij}^{pf} = d_{ji}^{pf} \tag{5}$$

$$d_i^{tx} = d_j^{tx} \tag{6}$$

$$d_i^{rx} = d_j^{rx} \tag{7}$$

3.1.3 브로드캐스트 시간동기화 정의

브로드캐스트 시간동기화는 멀티홉 네트워크의 노

드간 시간동기화를 위해 각 노드에 시간동기화 명령을 브로드캐스트하여 수신된 데이터를 기반으로 동기 지연시간을 역 보상하는 방식이다.

지연시간 역보상 과정은 그림 5와 같이 멀티홉 네트워크의 마지막 노드의 지연시간에 다른 노드의 지연시간을 일치화하는 과정이다. 시간동기화를 위해서는 노드간의 지연시간인 Δ_{ij} , 최초 노드에서 마지막 노드까지의 단방향 지연시간인 D_k 그리고 최초 노드에서 각 중간 노드까지의 지연시간인 D_i^{fw} 와 마지막 노드에서 각 중간 노드까지의 지연시간 D_i^{bw} 그리고 각 노드의 지연시간 보정값인 C_i 를 알아야 한다. 이를 위하여, 제안하는 브로드캐스트 시간동기화 방법에서는 지연시간 측정 (Δ_{ij} 측정 과정), 지연시간 취득 (D_k 취득 과정), 지연시간 보정 (D_i 취득 및 C_i 산출 과정)의 총 3가지 메커니즘이 순차적으로 수행된다. 브로드캐스트 시간동기화는 동기화 명령 전송 노드에서 인접 노드로 단 방향 지연시간측정 명령 전송 시 지연시간 취득 명령을 연달아 전송할 수 있으며 최초 노드에서 생성된 프레임이 마지막 노드까지 전달되는 구조로 동기화 설정 총 시간에서 노드마다 반복되는 d_{ij}^{pf} 와 d_i^{tx} 제거를 통해 동기화 설정시간을 감소시킬 수 있다.

3.1.4 전송 프레임 정의

전송 프레임은 제어 프레임과 데이터 프레임으로 구성되며 프레임의 생성 및 취득은 모든 노드에서 이루어진다. 전송 프레임의 Syntax 구성은 표 2와 표 3과 같으며 데이터프레임의 길이는 제어프레임과 데이터프레임이 동일하다. 이는 노드의 현재 시간을 나타내는 timestamp가 정수이므로 노드간 지연시간 측정

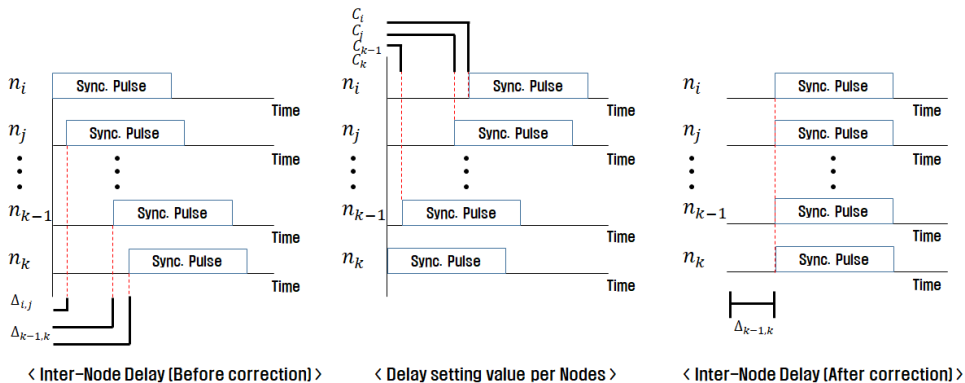


그림 5. 지연시간 역보상 과정
Fig. 5. Delay time reverse compensation process

표 2. 제어 프레임 정의
Table. 2. Control frame definition

Field	Value	Semantics
Sync Trigger	0xFB	Preamble
Mode	Delay Measurement	0x01
	Delay Acquisition	0x02
	Delay Correction	0x03
D_k	0x00 ~ 0xFF	Sum of Δ_{ij} in the entire Nodes
D_i^{fw}	0x00 ~ 0xFF	Sum of Δ_{ij} until the front node
FCS	0x00 ~ 0xFF	Error verification code

표 3. 데이터 프레임 정의
Table. 3. Data frame definition

Field	Value	Semantics
Feedback Trigger	0xFB	Preamble
D_i^{bw}	0x00 ~ 0xFF	Sum of Δ_{ij} until the back node
Reply Flag	0x00 (수행) 0x01 (미수행)	Response of delay measurement
Dummy	0x00	Dummy Field
FCS	0x00 ~ 0xFF	Error verification code

명령에 의해 RTT의 평균값 산출시 계산 에러를 최소화할 수 있다.

3.2 지연시간 측정 메커니즘

지연시간 측정 메커니즘은 n_i 와 n_j 의 단방향 지연을 측정하기 위한 과정은 그림 6과 같다.

n_i 는 지연시간 측정 모드 프레임을 생성하여 n_j 로 전송한다. 이때 n_i 의 timestamp 값을 $TimerStart$ 변수에 저장하고 다음 노드로 제어프레임을 전송 후 Feedback Trigger 수신을 대기한다.

n_j 는 모드 제어 Field를 확인하여 지연시간 측정 모드 여부를 확인하고 데이터 프레임을 생성하여 n_i 로 전송하고 다음 노드로 지연시간 측정 모드 프레임을 전송하며 위 과정을 반복한다. 이때 n_j 가 마지막

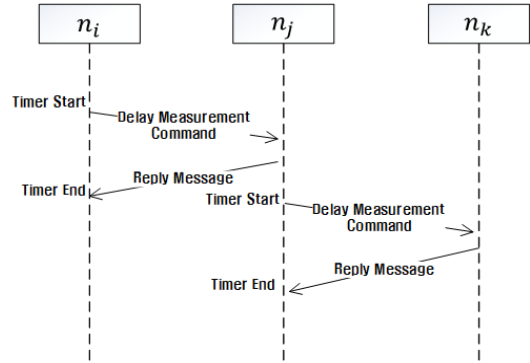


그림 6. 지연시간 측정 메커니즘 시퀀스 다이어그램
Fig. 6. Sequence diagram of delay time measurement mechanism

노드인 n_k 일 경우 n_i 로 데이터 프레임 전송 후 다음 노드로 제어 프레임을 전송하지 않는다. 이는 지연시간 측정 시 Feedback Trigger 미 회신으로 인한 제어 프레임 전송 노드의 Timer Overflow 방지 목적이다.

n_i 는 데이터프레임의 Feedback Trigger 수신 시 타이머의 동작을 중지하고 현재의 Timestamp 값을 $TimerEnd$ 변수에 저장 한다. 그리고 식 (8)에 따라 왕복 지연시간 d_{rtt} 를 계산하고 노드간 단 방향 지연시간 Δ_{ij} 을 식 (9)에 의해 계산 후 메모리에 저장한다.

$$d_{rtt} = TimerEnd - TimerStart \quad (8)$$

$$\Delta_{ij} = \frac{d_{rtt}}{2} \quad (9)$$

3.3 지연시간 취득 메커니즘

지연시간 취득 메커니즘은 n_1 에서 n_k 까지 단방향 지연시간을 취득하는 과정으로 시퀀스 다이어그램은 그림 7과 같다.

마스터 노드(n_1)는 지연시간 취득 모드로 프레임 생성 후 n_i 로 전송하고 수신 노드에서는 제어모드 및 최종 노드(n_k)여부를 확인한다. 이때 최종 노드에 프레임이 전달될 때 까지 위 과정을 반복하게 되며 최종 노드에서 제어 프레임을 수신하게 되면 Δ_{ij} 를 앞 노드로 전송하고 수신 노드는 자신의 Δ_{ij} 와 수신된 Δ_{ij} 를 합하여 다시 앞 노드로 전송하면서 역방향 지연시간 시간 합 D_i^{bw} 를 식 (10)과 같이 계산을 수행하고 마스터 노드에서는 식 (11)과 같이 단 방향 네트워크 지연시간을 취득하게 된다.

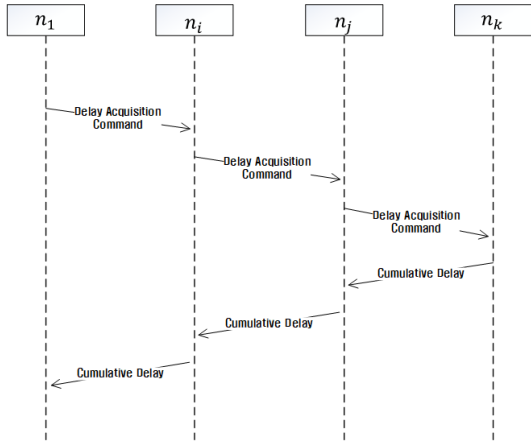


그림 7. 지연시간 취득 메커니즘 시퀀스 다이어그램
Fig. 7. Sequence diagram of Delay Time Acquisition Mechanism

$$D_i^{bw} = \Delta_{ij} + D_{i+1}^{bw} \quad (10)$$

$$D_k = \sum_{i=1}^k \Delta_{ij} \quad (11)$$

3.4 지연시간 보정 메커니즘

지연시간 보정 메커니즘은 지연시간측정 및 지연시간 처리 과정을 통해 획득된 데이터를 이용하여 노드 간 시간동기화를 위해 지연시간을 역보상하는 과정으로 시퀀스 다이어그램은 그림 8과 같다.

마스터 노드(\$n_1\$)는 지연시간 보정 프레임 생성 시 \$D_i^{fw}\$는 초기값인 0으로 설정하고 \$D_k\$를 포함하여 다음 노드로 프레임을 전송한다.

수신 노드는 지연시간 설정 모드 확인 후 식 (12)에 따라 정 방향 지연시간 합 \$D_i^{fw}\$를 계산하고 지연시간 보정 과정과 지연시간 보정 명령 전송 과정을 수행한다.

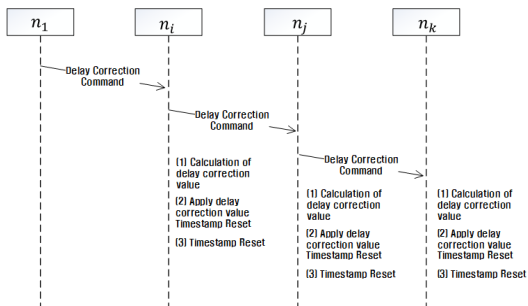


그림 8. 지연시간 보정 메커니즘 시퀀스 다이어그램
Fig. 8. Sequence diagram of Delay Time Correction Mechanism

$$D_i^{fw} = \Delta_{ij} + D_{i-1}^{fw} \quad (12)$$

지연시간 보정 과정은 식 (13)을 사용하여 지연시간 보정값 \$C_i\$를 계산하고 식 (14)를 사용하여 timestamp의 초기화 시기인 \$T_{reset}\$을 추정한다. 그리고 지연시간 보정 명령 전송 과정은 수신 노드가 최종 노드(\$D_k\$)가 아닐 경우 \$D_i^{fw}\$를 제어 프레임에 적용하여 다음 노드로 전송한다.

$$C_i = D_k - D_{i-1}^{fw} \quad (13)$$

$$T_{reset} = Time\ stamp + C_i \quad (14)$$

마지막으로 각 노드의 timestamp 값이 \$T_{reset}\$과 일치하면 시간동기화를 위해 timestamp를 0으로 초기화한다.

IV. 실험 결과

제안하는 브로드캐스트 시간동기화 메커니즘의 성능 실험을 위하여 그림 9와 같이 시뮬레이터를 제작하였으며 시뮬레이터 설계 도구는 동적 해석이 가능한 Simulink를 사용하였다.

성능 실험은 메커니즘의 동작 정확성을 확인하는 기능검증과 노드 수 증가에 따른 시간동기화 오차 그리고 노드간 지연 증가에 따른 시간동기화 설정시간 분석을 대상으로 수행하였다. 그리고 실험대상은 동일 기능을 수행하는 다수의 노드를 대상으로 했으며 따라서 각 노드의 timestamp 해상도 및 처리 지연시간은 동일하다.

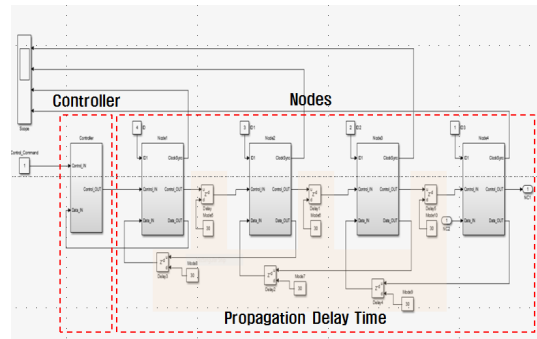


그림 9. 브로드캐스트 시간동기화 Simulator구성
Fig. 9. Configuring Broadcast Time Synchronization Simulator

4.1 제안 방법의 동작정확도 검증 시험

그림 10은 제안 방법의 동작 정확도 실험 결과를 보여준다. 그림 10 (a)에서와 같이 제안방법이 적용되지 않은 경우는 노드의 timestamp 시작 시간이 일치하지 않으나, 그림 10 (b)에 보인 바와 같이 제안 방법이 적용된 경우에는 시작이후 1.875 초 내에 모든 노드들의 시작 시간이 정확히 일치함을 알 수 있다.

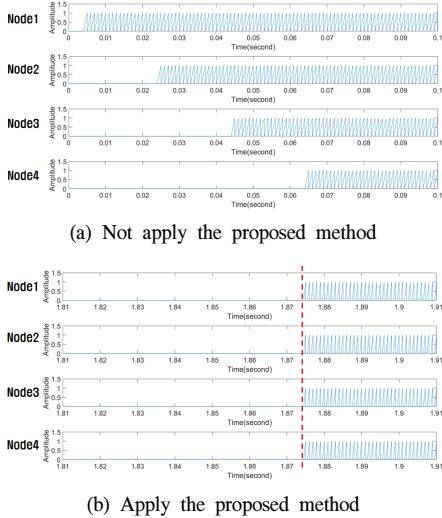


그림 10. 제안방법의 동작 정확도 시험 결과
Fig. 10. Mechanism operation accuracy test result

4.2 시간동기화 설정시간 비교

제안 방법의 시간동기화 설정시간 성능 비교를 위하여 Sender-Receiver 동기화 방식으로 멀티홉 네트워크에 적용 가능한 IEEE 1588 방식을 선정하였고, 각 방법의 메시지 전송에 의한 시간동기화 지연시간은 표 14와 같이 정의하였다.

노드 수 증가 실험 조건은 전파 지연 및 처리 지연을 고정값으로 설정하고 동기화 메시지 전송 경로를 고려했으며 노드를 2개에서 100개로 증가하면서 시간 동기화 설정 시간을 비교하였다. 그리고 지연시간 증가 실험은 전파지연(d_{ij}^{pf}) 및 처리지연(d_i^{tx} , d_i^{rx})을 10ms에서 500ms까지 증가하면서 시간동기화 설정시간을 검토하였다.

그림 11, 그림 12, 그리고 그림 13는 제안 방법과 IEEE 1588 방법 간 시간동기화 설정 시간을 각각 노드수, 노드간 전파 지연시간, 그리고 노드간 처리 지연시간이 변화하는 상황에 대하여 비교하였다.

그림 11에 보인 바와 같이, 제안 방법은 IEEE 1588

표 4 동기화 지연시간 정의
Table. 4. Define synchronization latency

구분	메시지	지연시간
Proposed Method	Delay Measurement	d_i^{tx}
	Delay Acquisition	$(d_i^{tx} + d_{i,j}^{pf} + d_j^{rx} + d_j^{tx} + d_{j,i}^{pf} + d_i^{rx}) \times n_{k-1}$
	Delay Correction	$(d_i^{tx} + d_{ij}^{pf} + d_j^{rx}) \times n_{k-1}$
IEEE 1588	Sync	$d_i^{tx} \times n_k$
	Follow up	$(d_i^{tx} + d_{i,j}^{pf} + d_j^{rx}) \times n_k$
	Delay Request	$(d_j^{tx} + d_{j,i}^{pf} + d_i^{rx}) \times n_k$
	Delay Response	$(d_i^{tx} + d_{i,j}^{pf} + d_j^{rx}) \times n_k$

에 비해 노드수 증가에 따른 시간동기화 설정 시간이 약 8% 비율로 감소 효과가 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 12에 보인 바와 같이, 노드간 전파지연시간 증가는 1%이하로 IEEE 1588과 대등한 수준으로 나타났다. 노드간 처리 지연시간 증가에 따른 감소 효과는

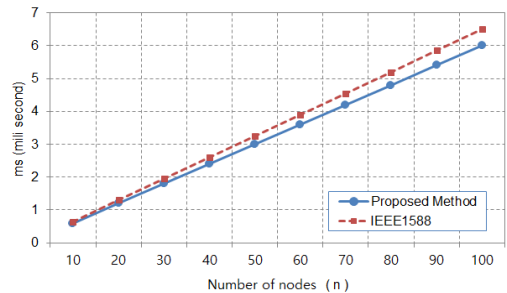


그림 11. 노드수에 따른 시간동기화 설정시간 비교
Fig. 11. Time Synchronization Setup Time Comparison by Number of Nodes

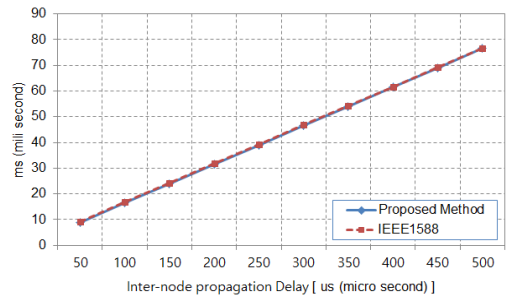


그림 12. 노드간 전파지연에 따른 시간동기화 설정시간 비교
Fig. 12. Time Synchronization Setup Time Compared to Node-to-Node Propagation Delay

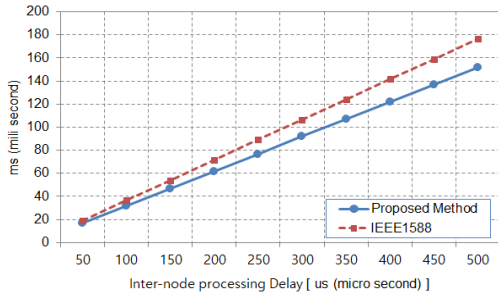


그림 13. 노드간 처리지연에 따른 시간동기화 설정시간 비교
Fig. 13. Time Synchronization Setup Time Compared to Node-to-Node Processing Delay

그림 13에 보인 바와 같이 약 14%의 비율로 크게 감소 효과가 있음을 알 수 있다.

V. 결론

멀티홉 네트워크의 릴레이 노드들은 최근 단순한 증폭기로 동작하기보다 주변의 신호를 취득 및 처리, 그리고 전송하는 역할을 수행하므로, 노드들에의 데이터 융합 및 에너지 절약을 위해서 노드간의 시간동기화가 필수적으로 요구된다.

본 논문에서는 멀티홉 네트워크 환경에서 다수 노드의 시간동기화 설정시간 감소를 위해 Sender-Receiver 방식과 Receiver-Receiver 방식의 복합구조인 브로드캐스트 시간동기화 메커니즘을 제안하였다.

제안 방법은 지연시간 측정 과정, 지연시간 취득 과정 그리고 지연시간 보정 과정이 순차적으로 이루어지며 지연시간 취득 과정은 노드간의 Round Trip Time을 통해 단 방향 지연시간 계산을 수행하며 지연시간 취득과정은 지연시간 보정에 필요한 최초 노드에서 최종 노드까지의 단방향 지연시간을 획득한다. 그리고 지연시간 보정 과정은 앞의 두 과정을 통해 얻은 데이터를 기반으로 각 노드에 지연시간을 보정하게 된다. 제안 방법은 멀티홉 네트워크를 구성하는 모든 노드를 대상으로 시간동기화 설정과정을 동시에 진행할 수 있어 동기화 시간을 감소할 수 있다. IEEE 1588과의 비교 실험을 통하여 제안방법의 효과성을 보였다.

시간동기화 설정시간 감소는 실시간으로 데이터 취득 및 처리가 필요한 환경에서 네트워크 초기화 설정 시간을 감소시킬 수 있는 주요 요소로 광범위한 영역을 담당하는 센서 네트워크와 같은 환경에 활용도가 높을 것으로 기대된다.

References

- [1] H. Yoo, "Synchronization techniques for OFDMA based wireless relay/mesh networks," Ph.D Dissertation, Chungang University, Feb. 2011
- [2] K. Almuradov, J. Park, and Y. Kim, "A performance bound of multi-hop multi-relay wireless communication systems with optimal path selection," *J. KICS*, vol. 36, no. 1, pp. 1-7, Jan. 2011.
- [3] M. O. Hasna, and M.-S. Alouini, "Outage probability of multihop transmission over nakagami fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 216-218, May 2003.
- [4] W. Lee, "Cross-layer design approaches for routing in wireless multi-hop networks," Ph.D Dissertation, Kwangwoon University, Aug. 2008.
- [5] D. Son and H. Chung, "A design of signal transport system with high reliability in an underwater sensor array," *J. KIMST*, vol. 7, no. 4, pp. 13-19, Dec. 2004.
- [6] F. Sivrikaya and B. Yener, "Time synchronization in sensor networks: A survey," *IEEE Network*, vol. 18, no. 4, pp. 45-50, Jul.-Aug. 2004.
- [7] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," *ACM OSDI'02*, vol. 36, pp. 147-163, 2002.
- [8] A. Cho, C. Yun, and Y. Lim, "A survey of time synchronization techniques in underwater acoustic networks," *J. KICS*, vol. 39, no. 3, pp. 264-274, Mar. 2014.
- [9] P. Huang, M. Desai, X. Qiu, and B. Krishnamachari, "On the multihop performance of synchronization mechanisms in high propagation delay networks," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 58, no. 5, pp. 577-590, Dec. 2008.
- [10] IEEE Std. 1588-2002, "IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for Networked measurement and control system," Jul. 2008

[11] S. Park, I. Kim, and D. Lee, "Implementation of IEEE1588 for clock synchronization," *J. KICS*, vol. 39, no. 2, pp. 123-132, Feb. 2014.

[12] S. Pudasaini and S. Shin, "Filtering scheme for mitigating synchronization inefficiency of IEEE 1588 PTP over packet-switched networks," *J. KINGC*, vol. 9, no. 3, pp. 26-34, Jun. 2014.

[13] J. No and Y. Hong, "Clock synchronization in wireless embedded applications," *J. KISS: Inf. Networking*, vol. 32, no. 6, pp. 668-676, Dec. 2015.

[14] S. Manju, N. Angayarkanni, and P. Venkatesan, "A propagation delay compensation protocol for accuracy improvement in clustered network," *Int. J. Advanced Res. in Computer and Commun. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 6526-6232, May 2014.

[15] K. Romer, "Time synchronization in ad hoc networks," *ACM MobiHoc'01*, pp. 173-182, Long Beach, CA, USA, Oct. 2001.

[16] J. Greunen and J. Rabaey, "Lightweight time synchronization for sensor networks," *WSNA'03*, pp. 11-19, San Diego, CA, USA, Sep. 2003.

[17] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," *SenSys'03*, pp. 138-149, Los Angeles, California, USA, Nov. 2003.

[18] R. Pabst, B. H. Walke, and D. C. Schultz, "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, Sep. 2004.

[19] A. Syed and J. Heidemann, "Time synchronization for high latency acoustic networks," *IEEE INFOCOM'06*, Apr. 2006

[20] J. R. Vig, "Introduction to Quartz Frequency Standards," Army Research Laboratory, Oct. 1992.

허 준 기 (Jun-ki Heo)



2008년 2월 : 한국해양대학교
전파.정보통신공학과 학사
2018년 8월 : 아주대학교 정보
통신공학과 석사
2013년 10월~현재 : LIG넥스원
(주) 선임연구원
<관심분야> 컴퓨터네트워크,
국방전술통신, 사물인터넷, 소나 시스템

노 병 희 (Byeong-hee Roh)



1998년 2월 : KAIST 전자공학
과 박사
1989년 3월~1994년 2월 : KT
연구원
1998년 2월~2000년 2월 : 삼성
전자 연구원
2014년 3월~2015년 2월 : ADD

객원연구원
2000년 3월~현재 : 아주대학교 교수
<관심분야> 이동멀티미디어통신, 혼합현실, 사물인
터넷, 미래인터넷, 국방전술통신네트워크, 네트워크
크보안