

TDMA 기반 MANET을 위한 계층교차적 네트워크 동기 아키텍처 연구

서명환[°], 김정식^{*}, 조형원^{*}, 정성현^{*}, 박종호^{**}, 이태진^{**}

A Study on Cross-Layer Network Synchronization Architecture for TDMA-Based Mobile Ad-Hoc Networks

Myunghwan Seo[°], Joung-Sik Kim^{*}, Hyung-Weon Cho^{*}, Sunghun Jung^{*}, Jongho Park^{**},
 Tae-Jin Lee^{**}

요 약

MANET에서 TDMA MAC 프로토콜을 사용하기 위해서는 단말의 이동과 전파 환경의 영향으로 토폴로지가 계속적으로 변화하는 환경에서도 단말 간에 정밀한 동기를 유지할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 TDMA 기반 MANET을 위한 in-band 방식의 계층교차적 네트워크 동기 구조를 제시한다. TDMA MAC 프로토콜과 proactive routing 프로토콜 간에 긴밀한 협력을 통해 단말 이동에 따른 네트워크 분리 및 통합을 신속하게 감지하고 네트워크 동기를 정밀하게 유지한다. 또한 제안된 동기 구조를 OPNET 시뮬레이터에 구현하고 다양한 시뮬레이션 시나리오를 통해 동기구조의 성능을 검증한다. 시뮬레이션 결과 네트워크 분리와 통합이 발생했을 때 이를 신속하게 인지하고 동기를 안정적으로 유지하는 것으로 나타났다.

Key Words : Network Synchronization Architecture, TDMA-based MANET, TDMA MAC Protocol

ABSTRACT

TDMA MAC protocol in MANET requires precise network synchronization between nodes though network topology changes continuously due to node mobility and the effect of propagation environment. In this paper we propose in-band cross-layer network synchronization architecture for TDMA-based MANETs. In the proposed architecture TDMA MAC protocol and proactive routing protocol cooperate closely to rapidly detect network partition and merge caused by node mobility and to precisely maintain network synchronization. We also implement the proposed synchronization architecture in OPNET simulator and evaluate the performance of it in various simulation scenarios. Simulation results show that our architecture stably maintains network time synchronization in both network partition and merge situations.

I. 서 론

TDMA(Time Division Multiple Access)는 타임 슬롯으로 나누어진 시간자원을 스케줄링을 통해 여

러 단말 간에 공유하는 매체접근방식이다. 단말은 충돌 없이 할당된 타임 슬롯을 사용하여 데이터를 성공적으로 전송할 수 있다. 이러한 특징은 QoS(Quality of Service)를 제공하는데 적합하기 때

• 주저자 겸 교신저자 : 삼성탈레스 통신연구소 무선통신그룹, myunghwan.seo@samsung.com, 정회원

* 삼성탈레스 통신연구소 무선통신그룹 jungsik98.kim@samsung.com, hyungweon.cho@samsung.com, sunghun.jung@samsun.com, 정회원

** 성균관대학교 정보통신대학 네트워크시스템 연구실 tamalove@ece.skku.ac.kr, 학생회원, tjlee@ece.skku.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2012-04-192, 접수일자 : 2012년 4월 14일, 최종논문접수일자 : 2012년 8월 1일

문에 QoS를 제공하기 위한 MANET(Mobile Ad-hoc NETWORK) 연구에서 TDMA를 MAC 프로토콜로 사용하는 경우가 많아졌다¹⁻³⁾. 또한 엄격한 QoS를 요구하는 진술 MANET에서도 TDMA MAC 프로토콜의 사용이 선호되는 추세이다^{4,5)}.

TDMA MAC 프로토콜을 사용하려면 타임 슬롯 간 충돌을 방지하기 위해서 네트워크를 구성하는 단말들 간에 us 수준의 정밀한 동기가 유지되어야 한다^{9,10)}. 일반적으로 MANET은 단말이 멀티 홉으로 떨어져서 구성된다. 또한 단말의 이동과 전파 환경의 영향으로 토폴로지가 계속적으로 변화하면서 네트워크가 분리되고 분리된 그룹이 다시 통합되는 상황이 반복된다. 이러한 MANET의 특징은 단말 간에 동기를 정밀하게 유지하는 것을 어렵게 한다.

네트워크 동기 방안은 동기를 위한 별도 솔루션의 사용여부에 따라 out-band 방식과 in-band 방식으로 구분할 수 있다. Out-band 동기 방식은 동기를 위해서 별도의 장치를 사용하는 방식으로 GPS가 대표적인 예이다. GPS의 경우 정밀한 동기를 제공하지만 실내나 큰 장애물이 있는 곳에서는 사용이 제약된다. 이에 반해, in-band 방식은 통신채널을 사용하여 동기를 맞추는 방식으로, 통신이 가능한 장소에서 동기를 맞출 수 있다. 많은 in-band 동기 프로토콜들이 ad-hoc network 적용을 위해 제안되었다⁶⁻¹⁰⁾. 하지만 대부분 이동성이 제한된 WSN(Wireless Sensor Network)과 WMN(Wireless Mesh Network)을 위해 제안되었으며 특정 단말을 기준으로 동기를 맞추기 때문에 네트워크 분리 및 통합이 빈번한 MANET 환경에 적용할 때 제약이 따른다.

본 논문에서는 TDMA 기반 MANET을 위한 in-band 방식의 계층교차적 네트워크 동기 구조를 제안한다. 제안된 동기 구조는 TDMA MAC 프로토콜과 proactive routing 프로토콜로 구성된다. 두 프로토콜은 긴밀한 협력을 통해 단말의 이동에 따른 네트워크 분리 및 통합을 신속하게 감지하고 네트워크 동기를 정밀하게 유지한다. 또한 제안된 구조를 OPNET 시뮬레이터에 구현하고 네트워크 통합 및 분리 시나리오에서 동기구조의 성능을 검증한다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2장에서 관련 연구를 설명하고, 3장에서는 제안된 동기 구조에 대해 구체적으로 기술한다. 4장에서 제안된 동기 구조를 OPNET 시뮬레이터에 구현한 내용에 대해 설명하고, 5장에서는 이를 사용한 성능분석 결

과를 기술한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

Ad-hoc network를 위한 다양한 in-band 동기 프로토콜이 제안되었지만 TDMA 기반 MANET을 위한 계층적 동기 구조는 아직까지 제시되지 않았다. [6,7]은 CSMA/CA MAC 프로토콜을 사용하고 있으며 wireless sensor network를 위한 동기 프로토콜을 제안하였다. [8,9]는 TDMA MAC 프로토콜을 위한 동기 방안을 제안하였지만, 기지국(base station)이나 게이트웨이(gateway)가 존재하는 WMN를 가정하고 있다. [10]는 NAMA라는 TDMA MAC 프로토콜을 위한 동기 방안 제시하였으나, 네트워크가 트리 구조이며 하나의 단말이 동기 기준 역할을 하는 것으로 가정하고 있다.

기존 in-band 방식의 동기 연구에서 네트워크 동기화 과정은 두 단말 간에 오차를 보정하는 과정과 멀티 홉 네트워크 전체를 동기화하는 두 과정으로 구분된다. 두 단말 간에 오차를 보정하는 과정은 패킷 교환 방식에 따라서 pairwise와 one-way로 구분할 수 있다. Pairwise 동기는 동기를 맞추려는 단말과 기준 단말 간에 동기 패킷을 교환한 후, 동기 패킷에 포함된 timestamp를 사용하여 오차를 계산한 후 보정하는 방식이다^{6,9,10)}. 이 방식은 전송 지연으로 발생하는 오차를 보정할 수 있다. 반면, one-way 동기는 송신 단말이 동기 패킷에 timestamp를 실어 보내고 수신 단말이 자신의 시간에 timestamp를 적용하는 방식으로, 패킷을 한 번 전송하지만 전파지연시간 오차가 발생한다^{7,8)}. 본 논문에서 제안된 동기 구조는 초기 동기 시 one-way 동기를 사용하여 대략적인 동기를 맞추고 후 pairwise 동기를 사용하여 정밀한 동기를 맞춘다.

멀티 홉 동기화 과정은 시간 기준 단말이 루트(root)가 되어 구성된 동기 트리를 통해 동기를 맞추는 방식^{6,9,10)}과 플러딩(flooding)을 통해 동기를 맞추는 방식^{7,8)}으로 나눌 수 있다. 본 논문의 동기 구조는 트리 방식을 사용하지만 동기 트리를 직접적으로 구축하지 않고 routing 프로토콜의 부모 (parent) 단말 선정기능을 활용한다.

기존 in-band 동기 연구는 대부분 기지국이나 게이트웨이와 같은 특정 단말을 동기 기준으로 사용하기 때문에 네트워크의 분리와 통합이 반복되는 MANET 환경에서의 사용이 제약된다^{6,8-10)}. [7]만이 WSN의 초기화와 기준 단말 고장 상황을 고려하여 동적으로 동기 기준 단말을 선정하는 방법을 제시하였다. 본 논

문의 동기 구조는 네트워크 ID를 사용하여 네트워크 분리와 통합을 인지하며, 동기 트리를 이용 하여 분리된 그룹 또는 통합된 그룹의 단말 간의 동기를 정밀하게 유지한다.

III. 계층교차적 동기 아키텍처

제안하는 동기 구조는 TDMA MAC 프로토콜과 routing 프로토콜이 계층교차적으로 동작하며, 기능적으로 세 가지 요소-2-phase 동기, 동기 부모 선정, 네트워크 통합 및 분리 감지-로 이루어진다.

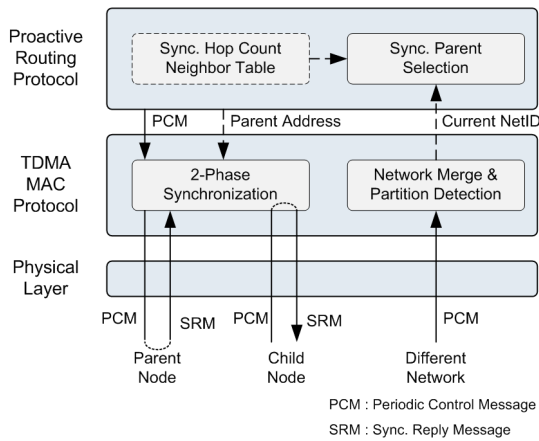


그림 1. TDMA 기반 MANET 동기 구조도
Fig. 1. Synchronization Architecture for TDMA-based MANET

그림 1은 제안하는 동기 구조를 설명한다. TDMA MAC 프로토콜은 단말간 동기를 유지하는 2-phase 동기와 단말 이동에 의해 발생하는 네트워크 통합 및 분리 감지하고 처리하는 기능을 담당한다. Proactive routing 프로토콜은 이웃 테이블에 동기 홉 수 (synchronization hop count) 정보를 추가로 유지하여 시간 동기의 기준이 되는 부모 단말을 선정하며, 선정된 부모 단말의 주소를 MAC 프로토콜에 제공한다.

제안된 구조는 TDMA MAC과 proactive routing 프로토콜을 계층교차적으로 설계하여 동기 관련 제어 오버헤드를 최소화 하였다. Routing 프로토콜의 주기적인 제어 메시지(periodic control message)를 동기화 과정의 요청 메시지로 사용하였고, 부모 단말 선정 시 routing 프로토콜을 활용함으로써 동기 트리 구축을 위한 별도의 제어 메시지를 생성하지 않았다.

그림 2는 계층교차적 동기 구조에서 사용하는 TDMA MAC 프로토콜의 프레임 구조이다. 프레임은 제어 슬롯과 데이터 슬롯으로 구분되며, 제어 슬롯에

서는 주기적 제어 메시지와 동기 응답 메시지를 전송한다. 주기적 제어 메시지에는 routing을 위한 경로 정보가 포함된다. 또한 phase 2 동기 요청 메시지로 사용하기 위해 부모 단말의 주소를 포함 시켰다. 동기 응답 메시지는 동기 요청을 받은 부모 단말이 주기적 제어 메시지의 수신 시간과 동기 응답 메시지의 전송 시간을 포함시켜 보내는 메시지다. 데이터 슬롯은 unicast와 broadcast 데이터 전송에 사용되며, 별도의 예약 프로토콜에 의해 예약 후 사용된다.

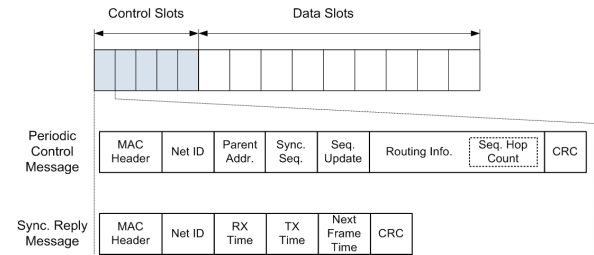


그림 2. TDMA MAC 프레임 구조
Fig. 2. Frame Format of TDMA MAC

3.1. 2-Phase 동기

2-phase 동기는 대략적 동기를 맞추는 phase 1 동기와 정밀 동기를 맞추는 phase 2 동기로 이루어진다. Phase 1은 동기가 전혀 이루어지지 않은 상황에서 TDMA 프레임의 시작점을 찾기 위해서 대략적으로 동기를 맞추는 단계이다. Phase 1 동기 시 one-way 방식을 사용한다. 즉, 이웃 단말이 전송하는 주기적 제어 메시지에 포함된 전송 시간 정보를 이용해 동기를 맞추며, 전파 지연 오차가 발생한다.

이후 phase 2 단계에서 TDMA 프레임의 슬롯 경계를 정밀하게 맞춘다. Phase 2는 주기적 제어 메시지와 이에 대한 응답 메시지를 이용하는 pairwise 동기 방법을 사용한다. 단, phase 2 동기를 위한 첫 번째 주기적 제어 메시지는 phase 1 오차로 인한 단말간 충돌을 막기 위해, 경로 정보를 생략해 메시지 크기를 최소화 하여 전송한다.

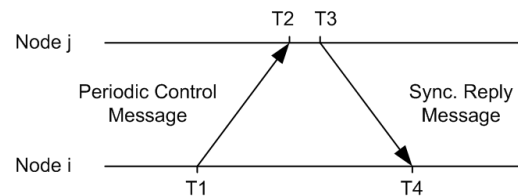


그림 3. Pairwise 동기 절차
Fig. 3. Pairwise Synchronization Process

그림 3은 pairwise 동기의 예를 보여준다. 노드 j를

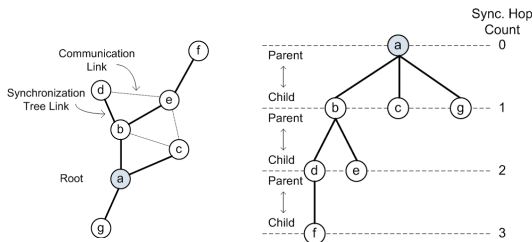
부모 노드로 선정한 노드 i 가 주기적 제어 메시지를 전송한다. 이를 수신한 노드 j 는 $T2$ 와 $T3$ timestamp 정보가 포함된 동기 응답 메시지(synchronization reply message)를 전송한다. 노드 i 는 응답 메시지를 수신한 후 단말 간 clock offset을 계산하여 자체 시간을 보정한다. Clock offset은 수식 1과 같이 계산된다.

$$\text{clock offset} = \frac{(T2 - T1) - (T4 - T3)}{2} \quad (1)$$

Phase 2 동기 후 두 단말의 시각이 동일하지만, 두 단말의 오실레이터 정확도 차이로 시간이 흐를 수록 차이가 벌어지게 된다. 따라서 phase 2 동기화 과정은 주기적 제어 메시지가 전송될 때마다 반복적으로 수행된다.

3.2. 동기 부모 단말 선정

Phase 2 동기에서 동기 대상은 동기 홉 수 정보를 바탕으로 결정된다. 동기 홉 수 정보는 동기 트리의 루트까지의 홉 수로, 각 단말은 주기적 제어 메시지 전송 시 이를 포함시킨다. Routing 프로토콜은 이웃 노드의 동기 홉 수 정보를 테이블로 유지하고, 이중 홉 수가 최소가 되는 단말을 부모 단말, 즉 동기 대상으로 선정한다. 홉 수가 같은 경우 링크 상황이 좋은 단말을 선정한다. 부모 단말을 선정하는 과정에서 그림 4와 같이 네트워크 관점의 동기 트리가 형성된다. 루트의 동기 홉 수는 0 이고, 트리의 깊이가 깊어질 수록 동기 홉 수가 증가한다. 동기 트리의 각 단말은 상위 레벨의 단말과 부모-자식(parent-child) 관계를 갖는다.



(a) 토폴로지 (b) 동기 트리

그림 4. 동기 트리 예시
Fig. 4. Example of Synchronization Process

동기 대상이 결정되면 이를 MAC 프로토콜에 알려 주고, MAC 프로토콜은 부모 단말과 pairwise 방식으로 오차를 보정한다.

3.3. 네트워크 통합 및 분리 인지

MANET에서는 단말의 이동과 전파 환경의 영향으로 네트워크가 분리되고 통합되는 현상이 발생한다. 따라서 이러한 네트워크 상황을 빠르게 인지하고 동기를 유지하는 과정이 필요하다. 즉, 네트워크가 분리된 경우 분리된 그룹의 단말 간에 동기를 유지할 수 있도록 새로운 동기 기준 단말이 선정되어야 하며, 분리된 그룹이 다시 통합되는 경우 하나의 동기 기준 단말을 중심으로 통합된 네트워크의 동기를 유지하여야 한다.

네트워크 통합 및 분리 감지는 주기적 제어 메시지에 포함된 네트워크 ID, 동기 순서번호, 동기 순서번호 업데이트 여부 필드를 이용해 수행된다. 네트워크 ID는 동기 트리의 루트 단말 주소이며 네트워크 ID가 다른 단말로부터 메시지가 수신되면 네트워크 통합이 감지된다. 이때 네트워크 ID가 낮은 네트워크로 통합된다. 즉 ID가 높은 네트워크의 단말은 낮은 네트워크로 ID를 변경하고 동기 대상 단말을 선정하여 2-phase 동기를 수행한다.

그림 5는 네트워크 통합 과정을 보여준다. 네트워크 ID가 i 와 j 인 두 네트워크가 인접하면서 경계에 있는 a 단말이 네트워크 i 를 발견한다(A). 네트워크 ID 비교 결과, i 가 j 보다 작기 때문에 a 단말은 네트워크 i 에 가입하기 위해 b 단말을 동기 대상으로 선택하여 동기를 맞춘다(B). 네트워크 j 의 다른 단말도 이와 같은 과정을 거쳐 네트워크 i 로 통합된다(C).

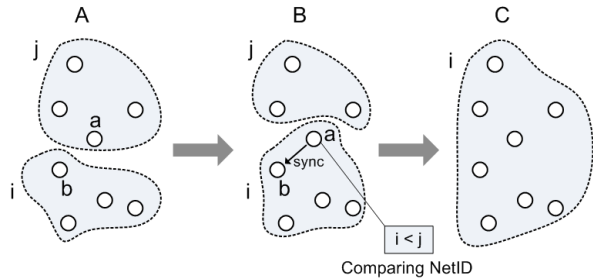


그림 5. 네트워크 통합 과정
Fig. 5. Network Merger Process

동기 순서번호는 동기 트리의 루트 단말로부터 매 주기 업데이트되며 주기적 제어 메시지를 통해 네트워크 전체로 전파된다. 단말은 동기 순서 번호가 특정 횟수 이상 연속으로 업데이트 되지 않으면 네트워크에서 분리되었다고 판단한다. 네트워크에서 분리된 단말은 네트워크 ID를 자신의 주소로 설정하고 자신이 동기 트리 루트 단말이 된다. 동기 순서번호 업데이트 여부 필드는 동기 되지 않은 네트워크로 통합되는 것을 방지하기 위한 필드로 순서번호가 업데이트 되지

```

MyID :: 나의 ID
MyNwkID :: 단말이 속한 네트워크 ID
MySyncSeqNo :: 이전에 수신한 동기 순서 번호
IsUpdatedSyncNo :: 동기 순서 번호가 업데이트 되었는지 여부

If 주기적 제어 메시지를 수신함 then
    RxNwkID := 주기적 제어 메시지에 포함된 네트워크 ID
    RxIsUpdatedSyncNo := 주기적 제어 메시지에 포함된 IsUpdatedSyncSeqNo
    RxSyncSeqNo := 주기적 제어 메시지에 포함된 순서번호
    If (RxNwkID < MyNwkID) && (RxIsUpdatedSync -No = True) then
        // 네트워크 통합
        MyNwkID := RxNwkID
        MySyncSeqNo := RxSyncSeqNo
        Execute 2-phase Synchronization.
    Else if RxNwkID = MyNwkID then
        If MySyncSeqNo < RxSyncSeqNo then
            MySyncSeqNo := RxSyncSeqNo
            IsUpdatedSyncNo := True
        End if
    End if
End if

If 주기적 제어 메시지를 송신하는 함수가 호출됨 then
    If IsUpdatedSyncNo = True then
        MissedSyncCnt := 0
        If MyNwkID = MyID then
            MySyncSeqNo := MySyncSeqNo + 1;
        End if
    Else if MyNwkID != MyID then
        MissedSyncCnt := MissedSyncCnt + 1
        If MissedSyncCnt > 3 then
            // 네트워크 분리
            MyNwkID := MyID
            IsUpdatedSyncNo := True
        End if
    End if
    주기적 제어 메시지(MyNwkID, MySyncSeqNo, IsUpdatedSyncNo)를 송신
    If MyNwkID != MyID then
        IsUpdatedSyncNo := False
    End if
End if
    
```

알고리즘 1. 네트워크 통합 및 분리 인지 알고리즘
 Algorithm 1. Detection Algorithm for Network Merger and Partition

많은 주기적 제어 메시지로 인한 네트워크 통합은 수행되지 않는다. 알고리즘 1은 네트워크 통합과 분리가 발생한 경우 이를 인지하고 처리하는 과정을 구체적으로 기술한 것이다.

IV. OPNET 동기 모델 구현

제안된 동기 구조의 성능을 검증하기 위해 OPNET 시뮬레이터에서 TDMA MANET 동기 모델을 구현하였다. 구현된 동기 모델은 그림 6과 같이 TDMA MAC 프로세스 모델, routing 프로세스 모델, 노드 모델로 구성된다. 본 장에서는 이에 대해 설명한다.

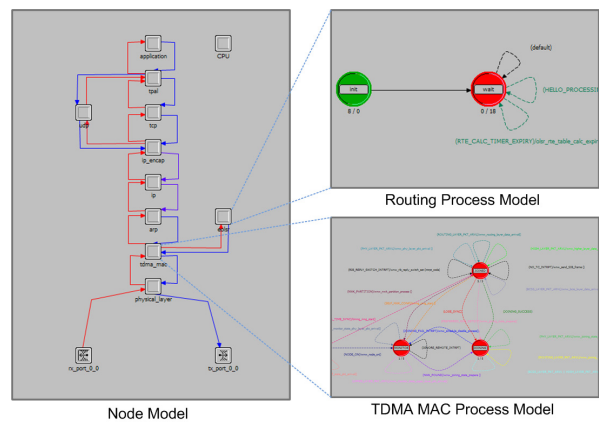


그림 6. OPNET 시뮬레이션 모델
 Fig. 6. OPNET Simulation Model

TDMA MAC 프로세스 모델은 메시지 송수신 기능과 함께 2-phase 동기와 네트워크 분리 및 통합 기능을 수행한다. 그림 7은 새로운 TDMA MAC 프로세스 모델을 구현하는데 사용된 상태 천이도를 간략하게 나타낸 것이다. 시뮬레이션이 시작되면 단말은 monitor 상태에서 임의의 시간 동안 모니터링 후, 기존 네트워크를 감지하면 합류를 시도하고, 기존 네트워크가 없는 경우 joined 상태로 들어가 자신이 루트가 되어 새로운 네트워크를 시작한다. Monitor 상태에서 기존 네트워크가 감지되면 joining 상태로 천이하여 2-phase 동기를 수행하며, 2-phase 동기의 phase 2 동기가 성공하면 joined 상태로 천이한다. 이때부터 데이터 송신이 가능하다. 한편 joined 상태에서 다른 네트워크로의 합류를 결정하면 joining 상태로 이동하여 다시 2-phase 동기를 시도한다. 네트워크 분리가 감지되면 상태변화 없이 스스로 동기 트리의 루트가 된다.

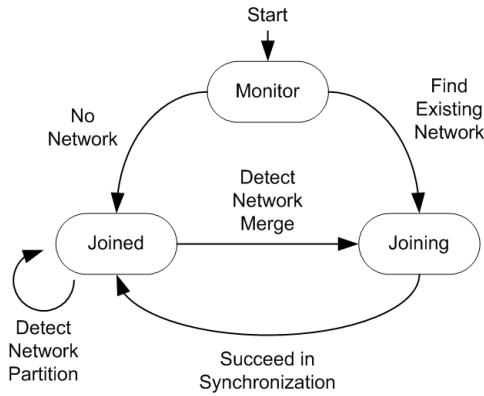


그림 7. TDMA MAC 프로세스 모델 상태 천이도
Fig. 7. State Transition Diagram of TDMA MAC Process Model

Routing 프로세스 모델은 OPNET에서 제공하는 OLSR 프로세스 모델을 수정하여 개발하였다. 개발된 routing 프로세스 모델은 동기 홉 수 정보를 유지하여 부모 단말을 선정하며 TDMA MAC 프로세스 모델과 계층교차적으로 동작한다.

시뮬레이션 시나리오를 만들기 위해서 동기 구조가 적용된 노드 모델이 필요하다. 이를 위해서 새로 개발된 MAC 및 routing 프로세스 모델과 기존 TCP/IP 프로세스 모델을 연결하여 TDMA 기반 MANET 노드 모델을 개발하였다.

V. 성능 분석

이 장에서는 OPNET 동기 시뮬레이터를 이용하여 제안된 동기 구조의 성능을 시험한다. MANET 환경에서 동기를 정밀하게 유지하는지를 알아보기 위해 다음 세 가지 시나리오에서 시뮬레이션을 진행한다. 분리 시나리오에서는 네트워크 분리 발생 시 이를 인지하고 새로운 네트워크가 제대로 만들어지는지를 확인한다. 통합 시나리오에서는 네트워크 통합을 인지하고 하나의 네트워크를 구성하는지를 확인한다. 마지막으로 임의의 이동 시나리오에서는 네트워크 분리 통합이 반복되는 경우에도 동기가 정밀하게 유지되는지를 확인한다.

다음은 세 시나리오에 공통적으로 적용된 시뮬레이션 파라미터이다. 단말의 전송범위는 230m이다. 150m 간격의 그리드 배치 시, 대각선에 위치한 두 단말이 안정적으로 통신할 수 있는 범위이다. Routing 프로토콜의 주기적 제어 메시지의 전송 주기는 1.5s이며, 각 단말의 오실레이터 clock drift는 1s당 -1us에서 1us 사이의 임의의 값으로 설정하였다. 시뮬레이션은

30분간 실시되었다.

네트워크 분리 시나리오에서는 40개 단말을 150m 간격으로 5x8 그리드 형태로 배치하였다. 시뮬레이션 시간은 30분이며, 10분 경과 후, 그리드의 오른쪽 20대 노드(5x4 그리드)를 오른쪽으로 20분동안 600m 이동시킨다. 네트워크 통합 시나리오에서는 5x4 그리드 형태로 배치된 두 그룹의 네트워크를 양쪽 끝에 배치 한 후, 오른쪽에 위치한 그룹을 20분 동안 왼쪽으로 600m를 이동시켜 5x8 그리드를 만든다. 임의의 이동 시나리오에서는 1000m x 1000m의 영역에 100대의 단말을 임의의 위치에 분포시키고 최대 5m/s 이동속도에 50s의 정지시간을 가지는 random waypoint 모델을 적용하였다.

제안된 동기 구조의 성능과 네트워크 분리 및 통합 처리 기능을 확인하기 위해 네트워크 수와 phase 2 동기 시 최대 동기 오차를 측정하였다. 네트워크 수는 시뮬레이션 중에 발생하는 루트의 수를 의미한다. 최대 동기 오차는 각 동기 트리의 루트 단말과 트리에 포함된 모든 단말 간의 시간 차 중 최대값을 나타낸다.

시뮬레이션에 적용된 재동기 주기와 오실레이터의 drift rate을 고려했을 때, n홉에서 발생 가능한 최대 오차는 수식 2와 같다.

$$\text{Sync. Period} \times |\text{Maximum Drift Rate}| \times 2 \times \# \text{hop} = 1.5s \times |\pm 1us/s| \times 2 \times n = 3nus \quad (2)$$

수식 2는 그림 8과 같이 동기 트리를 구성하는 루트와 그 이후 단말의 drift rate이 절대값은 1로 같지만 부호가 반대이며, 단말의 제어 슬롯이 동기 트리의 역순으로 할당되어 재동기 시점에서 네트워크 동기가 1홉씩 전파되는 경우의 오차계산식이다. 예를 들어 루트의 drift rate이 -1us/s이고 그 이후 단말이 1us/s 인 경우, 1홉 단말의 최대 오차는 재동기 직전 시점에서 3us이다. 이는 재동기 주기인 1.5s 동안 루트는 -1.5us, 1홉 단말은 1.5us 만큼의 clock drift가 발생하여 두 단말간에 오차가 3us가 되기 때문이다. 제어 슬롯이 역순이기 때문에 2홉 단말은 1홉 단말이 루트와 재동기하기 직전에 1홉 단말과 동기를 맞춘다. 따라서 2홉 단말은 1홉 단말의 오차가 최대일 때 동기를 맞추며, 2홉 단말의 최대 오차는 1홉 단말과 재동기가 이루어지기 직전의 오차이다. 2홉 단말의 재동기 시점까지 루트는 -1.5us, 2홉 단말은 1.5us 만큼의 clock drift가 발생하기 때문에 2홉 단말의 최대 오차는 3us 오차가 추가되어 6us가 된다. 결과적으로 홉이 증가할 때마다 3us 만큼 오차가 누적되어 n홉에서의 최대 오차는 3n

us가 된다.

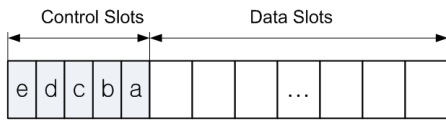
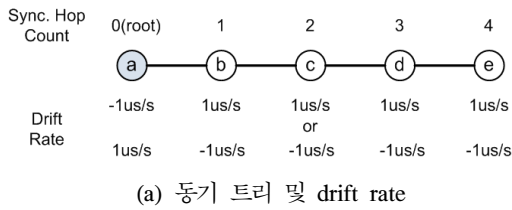


그림 8. 최대 동기 오차 발생 조건
Fig. 8. Condition for Maximum Synchronization Error

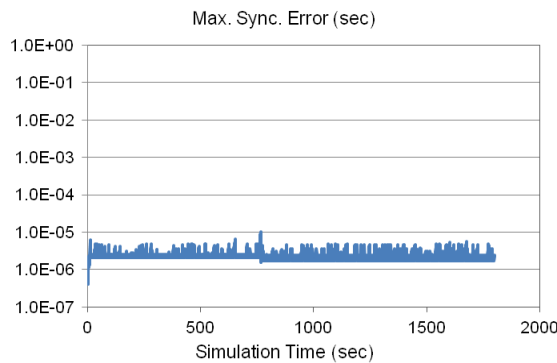
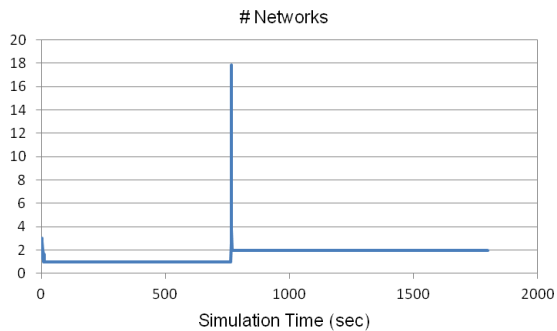


그림 9. 네트워크 분리 시나리오 결과
Fig. 9. Simulation Results of Network Partition Scenario

그림 9는 네트워크 분리 시나리오의 결과 그래프이다. 시뮬레이션 시작 후 네트워크 수가 일시적으로 증가하였다가 하나로 줄었다. 이는 단말마다 monitor 상태에서 모니터링 시간이 다르기 때문에, 모니터링 시간이 짧은 단말이 자신의 주소를 네트워크 ID하여 루

트가 되지만 잠시 후에 서로를 발견하고 하나의 네트워크로 통합되었기 때문이다.

이후 764s경에 네트워크 수가 18개까지 증가하였다가 두 개로 줄었다. 네트워크가 분리되면서 일시적으로 증가하였다가 분리된 그룹이 하나의 네트워크를 형성했기 때문이다. 600s 후 그리드의 오른쪽 20개 단말이 이동을 시작한다. 단말간 거리가 150m이고 통달 거리가 230m이기 때문에 분리되는 그룹간에 통신이 끊어지려면 80m를 이동해야 한다. 80m를 이동하는데 160s가 걸리기 때문에 760s 이후에 실제 분리가 일어난다. 분리된 그룹의 단말들은 동기 트리 루트의 시퀀스가 포함된 주기적 제어 메시지를 받지 못하기 때문에 일정시간 후 네트워크가 분리된 것으로 판단하고 새로운 네트워크를 형성한다. 이 과정에서 네트워크 수가 18개까지 증가하지만, 주변 단말을 발견하면서 분리된 그룹이 하나의 네트워크를 형성한다. 결과적으로 2개의 네트워크가 존재하게 되며 시뮬레이션이 종료될 때까지 유지된다. 이때 최대 오차가 네트워크가 분리되는 시점에서 10us까지 잠시 증가하지만 전체적으로 7us 미만으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 네트워크 통합 시나리오의 결과 그래프이다. 시뮬레이션 시작 후 두 그룹이 각각 하나의 네트워크를 형성한다. 600m를 이동하는데 1200s가 필요하지만 1050s경에 두 그룹의 통신이 가능해지면서 네트워크 통합을 시작해 하나의 네트워크를 형성한다. 네트워크 통합 시 오차가 최대 372us까지 증가한다. 이는 통합 전 두 그룹의 루트에서 발생된 clock drift 정도가 다르기 때문이다. 통합 이후에는 최대 오차가 5us 이하로 유지된다.

네트워크 분리 및 통합 시나리오 시뮬레이션에서 최대 5홉의 동기 트리가 형성되었다. 따라서 수식 2에 의해 발생 가능한 최대 오차는 15us 이다. 하지만 시뮬레이션 결과 최대 오차가 7us이하로 나타나 이론적인 최대 오차와 큰 차이를 보이는데, 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 오실레이터 drift rate이 임의의 값이기 때문이다. 즉, drift rate이 -1us/s 에서 1us/s 사이의 임의의 값이기 때문에 절대값이 1보다 작은 경우가 발생하며 동기 트리 상에 +와 -값이 불규칙적으로 반복되어 오차가 일부 상쇄된다. 이로 인해 이론적인 최대 오차처럼 일반적으로 커지지 않는다. 둘째, 동기트리의 자식 단말과 부모 단말의 제어 슬롯이 순차적으로 배치된 경우, 1.5s 주기 사이에 동기가 1홉 이상 맞춰지기 때문이다.

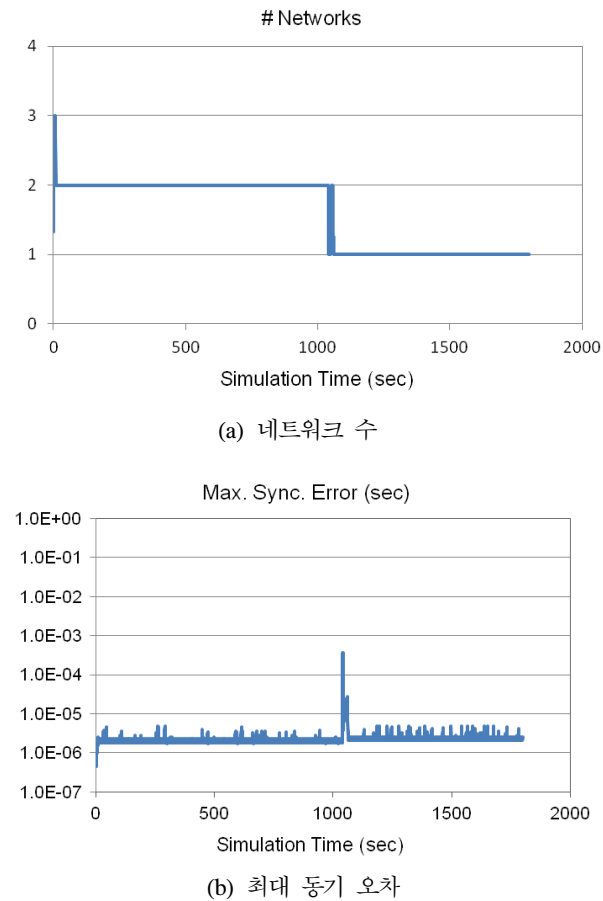


그림 10. 네트워크 통합 시나리오 결과
Fig. 10. Simulation Results of Network Merger Scenario

그림 11은 임의의 이동 시나리오에서의 결과이다. 네트워크 수를 살펴보면 시뮬레이션 초기에는 단말들이 합류되어 있지 않고 지속적으로 이동하기 때문에 네트워크 개수가 최대 40개가 넘어가지만 600초 이후에는 하나의 네트워크로 합류하고 간혹 이동성에 의한 네트워크 분리로 인해 네트워크 개수가 늘어나기도 하나 대부분 곧 다시 합류하는 것을 볼 수 있다. 최대 동기 오차는 20us 이상의 값을 가지는 것도 간혹 보이기 는 하나 안정화된 후 2us에서 20us 사이 값을 갖는다. 초기 잦은 네트워크 통합과 분리에도 불구하고 최대 동기 오차 값이 양호한 성능을 가짐을 알 수 있다.

임의의 이동 시나리오의 시뮬레이션에서 동기 트리는 안정화 후 최대 10홉까지 발생하였다. 임의의 이동 시나리오에서는 네트워크 분리 및 통합 시나리오와 다르게 단말들의 배치가 균일하지 않고, 단말들이 계속적으로 이동하기 때문에 홉 수가 높게 나타났다. 10홉에서 발생 가능한 이론적 최대 오차는 30 us이지만 시뮬레이션 결과 안정화 이후 20 us이하의 최대 오차를 보였다. 시뮬레이션의 최대 오차가 이론적인 최대 오차

보다 작은 이유는 네트워크 분리 및 통합 시나리오에서의 이유와 동일하다.

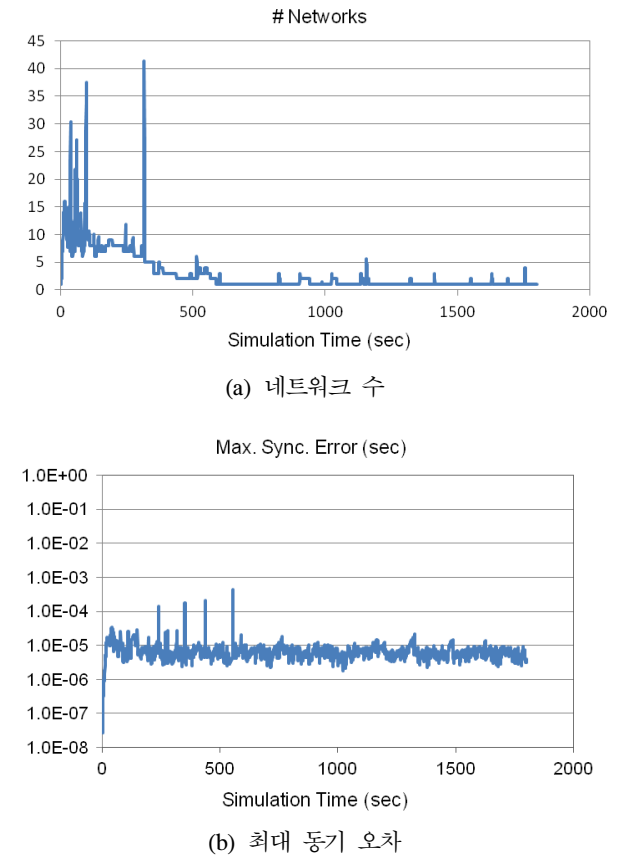


그림 11. 임의의 이동 시나리오 결과
Fig. 11. Simulation Results of Random Mobility Scenario

VI. 결 론

본 논문에서는 TDMA 기반 MANET을 위해 in-band 방식의 계층교차적 네트워크 동기 구조를 제시하였다. 제안된 동기 구조는 TDMA MAC 프로토콜과 proactive routing 프로토콜 간에 긴밀한 협력을 통해 네트워크 동기를 정밀하게 유지하며, MANET 환경에서 단말 이동에 따른 네트워크 분리 및 통합을 신속하게 감지하고 처리한다. 또한 제안된 구조를 OPNET 시뮬레이션 모델로 구현하여 동기구조의 성능을 검증하였다. 시뮬레이션 결과 네트워크 분리와 통합이 발생했을 때 이를 신속하게 인지하고 동기를 안정적으로 유지하였으며, 네트워크 통합 및 분리 시나리오와 random waypoint 모델이 적용된 임의의 이동 시나리오에서 단말의 최대 오차를 각각 7us와 20us 이하로 유지하였다. 제시된 최대 오차는 재동기 주기가 1.5s이고 오실레이터의

drift rate이 $-1\mu\text{s/s}$ 에서 $+1\mu\text{s/s}$ 사이의 임의 값일 때의 결과이며, TDMA MAC 프로토콜의 동기 요구 사항이 다른 경우 두 파라미터를 최적화하는 과정이 필요하다.

참고 문헌

[1] I. Jawhar and J. Wu, "QoS Support in TDMA-based Mobile Ad Hoc Networks", *Journal of Computer Science and Technology*, 20(6), pp.797-810, Nov. 2005.

[2] M. Seo, H. Cho, J. Park, J. Ahn, B. Choi, and T. Lee, "Distributed TDMA MAC Protocol with Source-Driven Combined Resource", ICN 2011, pp. 279-284, Jan. 2011.

[3] J. Li and Y. Wakahara, "Time Slot Assignment for Maximum Bandwidth in a Mobile Ad Hoc Network", *J. of Communications*, 2(6), pp. 56-64, 2007.

[4] C.D. Young, "The Mobile Data Link of the Joint Tactical Radio System (JTRS) Wideband Networking Waveform", IEEE MILCOM, 2006.

[5] FlexNet - Thales, http://www.thalesgroup.com/Portfolio/Defence/Defence_Products_MultibandRadios_Flexnet/.

[6] S. Ganerwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-Sync Protocol for Sensor Networks", SenSys'03, Nov. 2003.

[7] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol", SenSys'04, p. 39-49, 2004.

[8] D. Koutsonikolas, T. Salonidis, H. Lundgren, P. Le Guyadec, Y. C. Hu, and I. Sheriff, "TDM MAC protocol design and implementation for wireless mesh networks", ACM CoNEXT, pp.1-12, 2008.

[9] P. Djukic and P. Mohapatra, "Soft-TDMAC: A software TDMA-based MAC over commodity 802.11 hardware", IEEE INFOCOM 2009, pp. 1836-1844, Apr. 2009.

[10] S. Mo, J. Hsu, J. Gu, M. Luo, and R. Ghanadan, "Network Synchronization for

Distributed MANET", IEEE MILCOM 2008, Nov. 2008.

서명환 (Myunghwan Seo)



2002년 2월 충남대학교 정보통신공학과 학사
 2004년 2월 한국과학기술원 전자공학과 석사
 2009년 2월 한국과학기술원 전자공학과 박사
 2009년 1월~현재 삼성탈레스

전문연구원

<관심분야> Mobile Ad-hoc Network, Wireless Mesh Network, Network Synchronization, Military Wireless Communications

김정식 (Joung-Sik Kim)



2005년 2월 경북대학교 컴퓨터공학과 학사
 2007년 2월 경북대학교 컴퓨터공학과 석사
 2007년 3월~2011년 2월 한국전자통신연구원 연구원
 2011년 3월~현재 삼성탈레스

선임연구원

<관심분야> Mobile Ad-hoc Network, Wireless Sensor Network, Network Synchronization, Military Wireless Communications

조형원 (Hyung-Weon Cho)



1992년 2월 광운대학교 전자공 재료학과 학사
 1994년 2월 광운대학교 전자공 재료학과 석사
 2012년 2월 연세대학교 전기전자공학과 박사
 1997년 7월~현재 삼성탈레스

수석연구원

<관심분야> Military Wireless Communications, 통신 시스템, 네트워크 설계 및 최적화

정 성 현 (Sunghun Jung)



1990년 2월 연세대학교 전자
공학과 학사
1992년 2월 연세대학교 전자
공학과 석사
2006년 8월 연세대학교 전자
공학과 박사
1992년 3월~현재 삼성탈레스

수석연구원(그룹장)

<관심분야> Military Wireless Communications,
Array Signal Processing, Anti-Jamming, Mobile
Ad-hoc Network, Wireless Mesh Network

박 종 호 (Jongho Park)



2004년 2월 성균관대학교 정보
통신공학부 졸업 (학사)
2006년 2월 성균관대학교 전자
전기공학과 졸업 (석사)
2006년 3월~현재 성균관대학
교 전자전기컴퓨터공학과 박
사과정

<관심분야> 통신 네트워크 성능 분석 및 설계, 무
선 LAN/PAN, ad-hoc/센서/RFID 네트워크

이 태 진 (Tae-Jin Lee)



1989년 2월 연세대학교 전자공
학과 졸업 (학사)
1991년 2월 연세대학교 전자공
학과 졸업 (석사)
1995년 12월 University of
Michigan, Ann Arbor,
EECS (M.S.E.)

1999년 5월 University of Texas, Austin, ECE
(Ph.D.)

1999년 5월~2001년 2월 삼성전자 중앙연구소 책
임 연구원

2001년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 부
교수

<관심분야> 통신 네트워크 성능 분석 및 설계, 무
선 LAN/PAN/MAN, ad-hoc/센서/RFID 네트워크,
무선 통신 시스템