

FANET 환경에서 DDS Latency Budget 을 고려한 Cross-Layer 시스템 모델

홍준표, 서정민, 최평준*, 송선우, 신나나, 곽정호**
엘아이지넥스원, *대구경북과학기술원, **고려대학교

joonpyo.hong@lignex1.com, jeongmin.seo@lignex1.com, *pyeongjun.choi@dgist.ac.kr
sunwoo.song@lignex1.com, nana.shin2@lignex1.com, **jeonghokwak@korea.ac.kr

A Cross-Layer System Model for FANETs Considering DDS Latency Budget

Joonpyo Hong, Jeongmin Seo, Pyeongjun Choi*,

Sunwoo Song, Nana Shin, Jeongho Kwak**
LIG Nex1, *DGIST, **Korea Univ.

요 약

지속적으로 변화하는 네트워크 토폴로지를 가진 FANET 에서 DDS 를 활용할 경우, 설정된 Latency Budget 이 실제 종단 간 지연과 구조적으로 불일치 될 수 있다. 이를 위해 FANET 환경에서의 시간 가변적 지연 특성을 고려하여 DDS QoS 를 설계하여야 한다. 본 논문에서는 고정된 Latency Budget 운용 방식과 네트워크 상태 인지형 동적 Latency Budget 운용 방식에 대한 성능을 시뮬레이션을 통해 Deadline Miss ratio 와 지연 안정성 측면에서 분석한다.

I. 서 론

최근 UAV 를 기반으로 한 FANET(Flying Ad-hoc Network)은 감시·정찰, 통신 중계 등 다양한 임무를 수행하는 핵심 통신 인프라이다. FANET 은 고정된 통신 인프라에 의존하지 않고 다수의 UAV 가 자율적으로 네트워크를 구성하는 구조로, 전장과 같은 고기동 환경에서 신속한 정보 공유를 가능하게 한다. FANET 환경에서는 개별 노드 간의 협업을 위해 실시간 제어 메시지, 표적 정보 등이 지속적으로 교환되어야 하며, 이러한 데이터의 지연은 임무 성공 여부에 직접적인 영향을 미치며 편대 유지 실패, 표적 정보 오인 등 심각한 작전상의 문제로 이어질 수 있다.[1]

그러나 UAV 의 고속 이동으로 인해 네트워크 토폴로지는 지속적으로 변화하며, 노드 간 링크의 지속 시간은 짧다. 또한 전장 환경에서는 재밍, 간섭, 지형 장애물 등으로 인해 링크 오류율이 급격히 증가할 수 있으며, 노드의 추가 혹은 삭제가 빈번하게 발생할 수 있다. 이러한 요인들은 경로 재구성 지연, 큐잉 지연 누적 등을 유발하여 노드 종단 간 지연을 불규칙하게 만든다. 즉, FANET 환경에서 지연은 단순히 평균값으로 관리할 수 있는 파라미터가 아니라, 네트워크 상태에 따라 급격히 변동하는 시간 가변적 특성을 갖는다.

한편, DDS(Data Distribution Service)는 실시간 분산 시스템을 위한 Publish-Subscribe 기반 미들웨어로,

항공·국방·산업 제어 분야에서 널리 사용되고 있다. DDS 는 통신 노드의 주소나 연결 상태에 의존하지 않고 Topic 을 기반으로 데이터 분배를 수행함으로써, 노드 추가 및 삭제 등 변화하는 네트워크 토폴로지에도 유연하게 대응할 수 있다. 또한, DDS 는 Latency Budget, Deadline, Priority 등 다양한 QoS 파라미터를 제공하여 실시간성과 신뢰성을 네트워크에 반영할 수 있도록 설계되었다. 특히, Latency Budget 은 특정 데이터가 허용 가능한 최대 지연 시간을 정의함으로써, 지연 요구사항을 관리할 수 있는 수단을 제공한다.[2]

기존 연구들에서는 DDS QoS 를 안정적인 네트워크 환경을 전제로 설계하여 Latency Budget 을 정적인 값으로 유지되거나 네트워크 지연이 완만하게 변한다는 가정을 내포하였다. 반면, FANET 은 빈번한 토폴로지 변화로 인해 지연 특성이 급격히 변하기에 동일한 DDS QoS 설정을 유지하더라도, Latency Budget 위반 및 Deadline Miss 가 빈번하게 발생할 수 있다.

이러한 현상은 단순한 파라미터 튜닝의 문제가 아니라, DDS QoS 와 FANET 네트워크 특성 간의 구조적 불일치에서 기인한다. 이에 본 논문은 FANET 환경에서 DDS QoS 를 적용할 때 발생할 수 있는 구조적 한계를 명확히 하고, 향후 지연 인지형 Cross-Layer 시스템 모델 설계를 위한 기초적인 설계 관점을 제시하고자 한다.

II. 본론

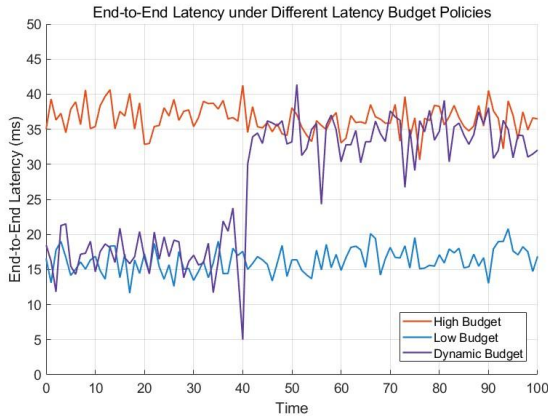
본 논문에서는 FANET 환경에서 중단 간 지연을 구성하는 주요 지연 요소들을 계층별로 분해하여 모델링하여 실제 중단 간 지연 불일치를 정량적으로 확인한다. FANET 환경에서 발생하는 지연은 다중 홉 전송 과정에서 누적되는 라우팅 지연, 큐잉 지연, 재전송 지연 등의 합으로 구성되며, 이러한 지연 성분들은 네트워크 상태 변화에 따라 큰 변동성을 가진다. 따라서 DDS QoS 를 응용 계층에서 정적으로 설정하는 기존 방식만으로는 FANET 환경의 지연 특성을 충분히 반영하기 어렵다.

중단간 지연 D_{E2E} 를 식으로 표현하면, 아래와 같다.

$$D_{E2E} = D_{route} + \sum_{h=1}^{H(t)} D_h + D_{DDS}$$

이 때, D_{route} , D_h 는 각각 라우팅 계층에서의 경로 구성 지연, 홉 h 에서의 큐잉 및 재전송 지연이며, FANET 환경에서 이는 매우 불규칙적이다. 따라서, DDS QoS를 최적으로 설정하기 위해서는 DDS 내부 처리 지연인 D_{DDS} 를 제외하고 네트워크 계층 이하에서 NSI(Network State Index) 정보를 수집하여 응용 계층에 반영하는 Cross-Layer 시스템 모델이 설계되어야 한다.

본 시뮬레이션 환경은 3차원 공간에서 20대의 UAV가 Stochastic Mobility Model에 따라 이동하는 시나리오로 구성되었다. UAV의 이동으로 인해 다중 홉 경로의 길이는 시간에 따라 변화하며, 전장 환경을 고려하여 재밍 이벤트가 확률적으로 발생하도록 설정하였다. 또한, 시간 $t=40$ 에 전체 노드 중 20%가 전장을 이탈하는 시나리오이며, Dynamic Budget 정책의 경우 사전에 이를 고려하여 정책을 설정하고 실험을 진행하였다. 비교 정책은 Latency Budget을 높은 값으로 고정시킨 High Budget과 낮은 값으로 고정시킨 Low Budget, 그리고 Latency Budget이 동적으로 변하는 Dynamic Budget이다.

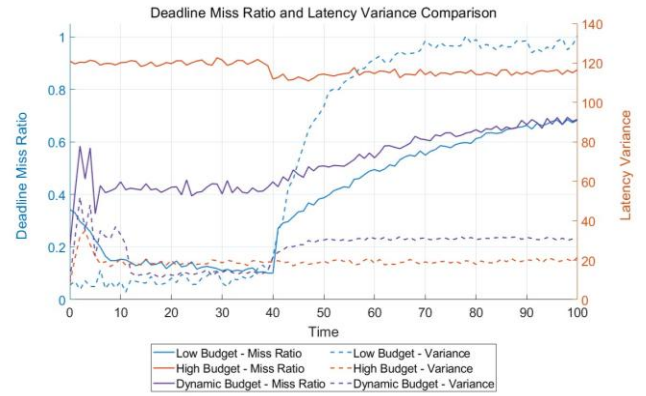


<그림 1. Latency Budget 정책에 따른 중단간 지연>

그림 1 은 FANET 환경에서 Latency Budget 운용 방식에 따른 중단 간 지연 변화를 나타낸다. High Budget과 Low Budget은 Latency Budget이 고정되어 있기에 중단 간 지연 시간에 변화가 크지 않은 반면 Dynamic Budget은 $t=40$ 을 기점으로 중단 간 지연 시간의 변화가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

그림 2 은 FANET 환경에서 Latency Budget 운용 방식에 따른 Deadline Miss ratio 그래프와 Latency Variance 그래프이다. Deadline Miss ratio는 각 메시지가 설정된 Deadline을 넘은 비율로 메시지 지연율을 나타내는 그래프이며, Latency Variance는

지연 시간 값들의 분산으로 메시지들의 지연 불안정성을 나타낸다.



<그림 2. Latency Budget 정책에 따른 Deadline Miss ratio와 Latency Variance>

Latency Budget이 높은 High Budget 정책은 지연 불안정성은 낮으나 메시지 지연율이 높은 것을 확인할 수 있고, Latency Budget이 낮은 Low Budget 정책은 메시지 지연율은 낮으나 노드들이 전장을 이탈하는 $t=40$ 에 메시지 지연율이 급격히 높아지며, 지연 불안정성도 높아지는 것을 확인할 수 있다. Dynamic Budget 정책은 $t=40$ 이전에 High Budget보다 메시지 지연율이 최대 56% 만큼 낮으며, $t=40$ 이후에는 Low Budget보다 지연 불안정성이 최대 73%까지 낮아 두 정책보다 안정적인 서비스 품질을 제공할 수 있다.

III. 결론

FANET 환경에서는 중단 간 지연이 시간에 따라 변동하며, 이러한 특성은 기존의 DDS 연구에서 가정하는 정적 QoS 설정과 불일치를 야기할 수 있다. 본 논문은 FANET 환경에서 DDS를 적용할 때, 설정된 Latency Budget이 네트워크 상태 변화로 인해 실제 중단 간 지연과 구조적으로 불일치 될 수 있음을 문제로 제기하고, 시뮬레이션을 통해 고정된 Latency Budget을 사용하는 High Budget 및 Low Budget 정책보다 네트워크 상태를 인지하여 Latency Budget을 동적으로 운용하는 방식이 Deadline Miss ratio와 지연 분산 측면에서 보다 안정적인 서비스 품질을 제공할 수 있음을 보였다. 본 연구는 FANET 환경에서 DDS QoS를 효과적으로 운용하기 위한 기초적인 설계 관점을 제시하며, 향후 연구에서는 Deadline, Priority, Reliability 등 다양한 DDS QoS를 함께 고려한 멀티도메인 기반 Cross-Layer 시스템 모델로 확장할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] G. M. Cappello et al., "Optimizing FANET Lifetime for 5G Softwarized Network Provisioning," in IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 19, no. 4, pp. 4629-4649, Dec. 2022
- [2] S. El-Ferik, B. Almadani and S. M. Elkhider, "Formation Control of Multi Unmanned Aerial Vehicle Systems Based on DDS Middleware," in IEEE Access, vol. 8, pp. 44211-44218, 2020