

위성-지상 통합 네트워크에서의 QoS 라우팅 알고리즘

이 상 훈*, 최 홍 록*, 류 동 균*, 김 하 은*, 김 준 형**,
박 진 호**, 박 현**, 김 기 훈*, 안 성 준***, 백 상 현°

QoS-aware Routing Algorithm in Satellite and Ground Integrated Networks

Sanghoon Lee*, Hongrok Choi*, Dongkyun Ryoo*, Haeun Kim*, Junhyeong Kim**,
Jinho Park**, Hyun Park**, Kihun Kim*, Sungjoon Ahn***, Sangheon Pack°

요 약

지상 네트워크는 제한된 커버리지로 인해 통신 사각지대와 장거리 통신에서 Quality of Service (QoS) 보장이 어렵다. 이를 해결하기 위해 저궤도 위성을 활용한 위성-지상 통합 네트워크 환경이 주목받고 있다. 저궤도 위성은 지상 네트워크와 먼 거리에 위치해 있음에도, 기존의 연구들은 전송 지연만 계산하고 위성의 긴 전파 거리를 고려하지 않아 적절한 라우팅 경로를 찾기 어렵다는 한계가 있다. 본 논문에서는 전송 및 전파 지연을 모두 고려한 weighted Expected Propagation and Transmission Time (wEPTT) 라우팅 메트릭과 utility 기반 QoS 라우팅 알고리즘을 제안한다. 실험 결과, 기존의 라우팅 메트릭에 비해 wEPTT는 낮은 지연 시간 및 높은 처리량을 갖는 것을 확인하였다.

Key Words : LEO Satellite, Multi-hop Network, Routing, QoS, Utility

ABSTRACT

Terrestrial networks face challenges in ensuring Quality of Service (QoS) due to limited coverage, especially in dead zones or long-distance communications. To address this, satellite-terrestrial integrated networks using Low Earth Orbit (LEO) satellites have gained attention. However, existing studies mainly consider transmission delay, neglecting the impact of long propagation distances, which hinders optimal routing. This paper proposes a utility-based QoS routing algorithm with a weighted Expected Propagation and Transmission Time (wEPTT) metric that accounts for both transmission and propagation delays. Experimental results show that wEPTT achieves lower latency and higher throughput than a conventional metric.

※ 이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방신속획득기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(UU230002D)

* First Author : Korea University, School of Electrical Engineering, shunlee134@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korea University, School of Electrical Engineering, shpack@korea.ac.kr, 종신회원

* Korea University, School of Electrical Engineering, {ghdfhrooo, rdk0610, 170999}@korea.ac.kr, 학생회원

** Hanwha System, {jhkim94, jinho83.park, h82.park, kihun19.kim}@hanwha.com

*** Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute, sj_ahn@add.re.kr

논문번호 : 202412-317-C-RN, Received December 12, 2024; Revised December 14, 2024; Accepted December 14, 2024

I. 서 론

5G 기술의 발달에 따라 모바일 단말, 인터넷 사용자 및 애플리케이션의 수가 급격히 증가함으로써 네트워크 트래픽 또한 방대해지고 있다^[1]. 하지만 지상 네트워크는 산악지역, 사막과 같은 일부 지역들에 데이터 통신 서비스를 제공하지 못하며, 장거리 전송 시 지연 시간이 길어져 높은 데이터 속도 및 신뢰성 확보에 한계가 있다^[2]. 이에 따라, 장거리 통신이나 통신 사각지대에서도 여러 애플리케이션의 Quality of Service (QoS) 요구사항을 만족시키기 위해 위성을 활용하는 위성-지상 통합 네트워크가 주목받고 있다^[3]. 특히, 저궤도 위성은 지상으로부터 가까운 300~1,500 km 상공에 위치하고 있어 상대적으로 짧은 지연 시간을 제공하며 차세대 네트워크의 핵심 기술로 평가된다.

위성-지상 통합 네트워크에서는 서로 다른 네트워크 특성을 반영하기 위해 링크 상태를 고려하는 것이 필수적이다. 이를 무시할 경우 네트워크 안정성 및 지연 시간 성능이 저하될 수 있다^[4]. 이러한 문제를 해결하기 위해 라우팅 메트릭을 활용하여 경로 성능을 예측하고, 라우팅 경로를 결정하는 연구들이 제안되어 왔다. 주요 라우팅 메트릭으로는 링크 오류율을 측정하는 Expected Transmission Count (ETX), 전송 지연 시간을 측정하는 Expected Transmission Time (ETT), 플로우 간 간섭을 측정하는 Metric of Interference and Channel Switching (MIC) 등이 있다^[5]. 하지만, 이러한 라우팅 메트릭들은 전파 거리가 비교적 짧은 지상 네트워크 환경을 가정하여 링크 상태를 평가하기 때문에 위성 환경에는 적합하지 않다. 지상 네트워크와 달리 위성 네트워크에서는 전파 지연이 주요 링크 성능 요소이기 때문에 이를 제외하고 링크 성능만을 측정하게 되면 위성의 실제 성능과는 격차가 발생하여 네트워크 성능 저하로 이어질 수 있다^[6].

따라서, 최근에는 위성 환경을 반영하여 라우팅 경로를 결정하는 연구들이 진행되고 있다. [4]에서는 네트워크를 지상, 공중, 위성으로 계층화하고, 각 계층의 게이트웨이에서의 트래픽 양과 ETX를 곱한 값을 최소화하는 게이트웨이를 찾는 알고리즘을 제안하였다. 각 계층에서의 게이트웨이를 선택하여 라우팅 경로를 결정하고, 이를 통해 이중 네트워크에서 각 계층의 트래픽 부하와 링크 상태를 고려하여 특정 계층 노드에 부하가 집중되는 문제를 방지할 수 있다. [7]에서는 각 플로우의 QoS를 반영하여 위성과 지상 노드를 연결하는 게이트웨이 선택 문제를 Mixed Integer Linear Programming (MILP)로 정의한다. 그리고 변수의 정수

조건을 실수 범위로 변환하는 relaxation 기법을 통해 문제 복잡도를 낮춰 라우팅 경로를 지정하였다. 이러한 연구들은 네트워크 특성이 다른 지상 및 위성 네트워크를 모두 고려하여 라우팅 경로를 지정하지만, 위성의 전파 거리를 직접적으로 반영하지 않아 지상과 위성 간 링크의 정확한 평가가 어렵고, 이로 인해 각 데이터 타입의 요구를 충족하는 라우팅 경로를 제공하지 못할 수 있다는 한계가 있다.

한편, 위성의 전파 특성을 고려하여 라우팅 메트릭을 결정하더라도 일반적으로 QoS를 고려하는 라우팅 문제는 높은 복잡도를 가진다^[8]. 따라서 각 경로의 조합을 모두 비교하여 최적해를 도출하는 것은 시간이 많이 소요될 수 있다^[9]. 라우팅의 계산 복잡도 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있으며, 라우팅 경로의 midpoint를 결정하여 복잡도를 줄이는 방법들이 제안되고 있다. 특히, 연구 [10]에서는 네트워크 환경 정보를 바탕으로 노드의 중요도를 수치적으로 표현하는 Betweenness Centrality (BC)를 활용해 중요도가 높은 노드를 midpoint로 선택하여 라우팅 경로를 계산하였다. 해당 연구는 플로우가 통과할 midpoint를 사전에 선택하고 나머지 경로를 탐색함으로써 복잡도를 효과적으로 줄일 수 있다는 것을 증명하였다. 또한, midpoint의 수에 따라 탐색 공간이 넓어져 실행 시간 및 성능 향상에도 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 midpoint 기반 라우팅을 적용하여 QoS 라우팅의 높은 복잡도 문제를 해결하고 각 데이터 타입별 차등적인 네트워크 성능을 제공한다.

앞서 설명한 라우팅 메트릭 및 라우팅 알고리즘의 복잡도 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 전송 지연과 전파 지연을 모두 고려하는 weighted Expected Propagation and Transmission Time (wEPTT) 및 utility 기반 QoS 라우팅을 제안한다. wEPTT는 위성의 전파 특성을 고려하여 링크 평가를 보다 정확하게 할 수 있다. 또한, 라우팅 알고리즘의 복잡도를 줄이기 위해 BC 기반으로 midpoint를 선택하여 경로 조합 수를 감소시키고, 데이터 타입별 지연 시간 만족도를 계산하는 utility를 통해 네트워크 성능 하락을 방지한다. 시뮬레이션 결과는 wEPTT를 통해 기존의 라우팅 메트릭보다 지상, 위성 링크 상태를 적절히 평가하여 처리량에서 최대 49.7 %, 지연 시간에서 최대 32.5 %의 성능이 향상된 것을 보여주었다.

2장에서는 본 논문에서 고려하고 있는 시스템 모델을 기술하고, 3장에서는 utility 기반 QoS 라우팅 알고리즘을 설명한다. 이를 이용한 시뮬레이션 결과를 4장에서 설명하고 5장에서는 결론 및 향후 연구 계획에

대해 논의한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서의 시스템 모델을 나타낸다. 네트워크는 Software-Defined Networking (SDN) 구조로 이루어져 있고 네트워크 관리 및 제어 기능을 담당하는 컨트롤 평면과 스위치 등의 네트워크 장비를 통해 데이터를 전송하는 데이터 평면으로 구분된다. 데이터 평면은 여러 Autonomous System (AS)들과 저궤도 위성으로 구성되며, 각 AS는 데이터 전달을 담당하는 스위치 노드와 다른 AS로 데이터 송·수신을 위한 게이트웨이 노드로 이루어져 있다. 이때, 저궤도 위성 및 각 스위치를 연결하는 링크 l 은 대역폭 BW_l 을 가진다. AS 내 스위치에서는 다양한 데이터 타입의 플로우들이 발생한다고 가정한다. 라우팅 경로를 지정하기 위해 AS 내 혹은 AS 간 전달해야 하는 플로우 식별 정보 및 플로우 크기 정보를 나타내는 플로우 요청을 서버에 위치한 컨트롤 평면으로 보낸다. 컨트롤 평면에서는 가상화된 컨트롤러가 데이터 평면으로부터 전달받은 5-tuple 플로우 식별 정보, 플로우 크기를 바탕으로 각 플로우에 맞는 라우팅 경로를 할당한다.

저궤도 위성은 지상으로부터의 데이터 전달 요청을 받아 출발지 노드에서 도착지 노드로 데이터를 전달하는 릴레이 노드의 역할을 수행한다. 또한, 모든 스위치는 위성 라우터 및 포워딩 노드로서 동작한다고 가정한다.

한편, 라우팅 테이블을 업데이트하기 위해 일정 주기마다 라우터들은 컨트롤러에 업데이트 요청을 보내게 된다. 컨트롤러에서는 이를 수신하고 네트워크 정보를 바탕으로 다시 라우터들에 라우팅 테이블을 보내 업데이트한다. 그림 2와 같이, 컨트롤러는 데이터 평면으로부터 전달받은 플로우 크기, 플로우 정보 및 링크 상태 정보를 통해 각 플로우의 라우팅 경로를 결정하게 된다.

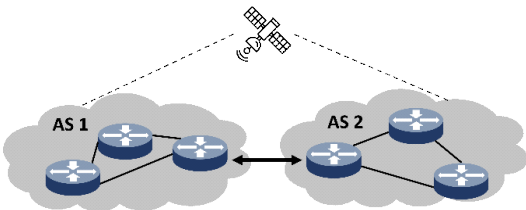


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

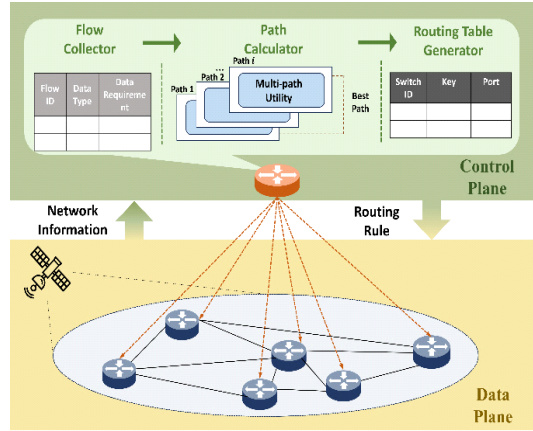


그림 2. 라우팅 경로 계산을 위한 제안 프레임워크
Fig. 2. Proposed framework for routing path calculation

III. Utility 기반 QoS 라우팅 알고리즘

링크 성능을 효과적으로 파악하기 위해 라우팅 메트릭은 다음의 조건들이 요구된다^[5]. 1) 최소 비용 경로가 실제로 좋은 성능을 보장하도록 네트워크 특성을 반영해야 한다. 위성은 지상 네트워크와 달리 전파 거리가 길기 때문에 이를 무시하면 지연이 크게 늘어날 위험성이 있다. 2) 다항식의 복잡도를 갖는 알고리즘으로 최소 비용 경로를 찾을 수 있어야 한다. 그렇지 않으면, 네트워크 규모와 플로우 수 증가에 따라 경로 조합이 기하급수적으로 증가하여 라우팅 경로를 결정하는 시간이 길어질 수 있다.

본 논문에서는 1)과 2)의 문제를 해결하기 위해 wEPTT 및 midpoint 기반 라우팅 알고리즘을 제안한다.

3.1 weighted Expected Propagation and Transmission Time (wEPTT)

기존의 라우팅 메트릭들은 위성의 주요 지연 요소를 고려하지 않아 라우팅 경로를 결정하는 데 있어 최소 비용을 분별하기 어렵다는 한계점이 있다. 이를 극복하기 위해 wEPTT는 대역폭, 링크 안정성만이 아니라 링크 거리도 고려한다. wEPTT는 경로의 대역폭을 통해 전송 지연 성능을 측정하는 ETT와 전파 지연을 측정하는 Expected Propagation Time (EPT)로 구성되어 있다.

ETX는 무선 환경에서 패킷 손실률 p 의 영향을 파악하여 성공적으로 패킷을 보내기 위해 필요한 예상 전송 횟수를 의미한다. 수식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$ETX_l = \frac{1}{1 - p_l} \quad (1)$$

ETX는 링크별 패킷손실률을 기반으로 데이터 전송 가능성을 평가하지만, 링크 대역폭 차이는 반영하지 않는다. 반면, ETT^[11]는 링크 상태를 패킷 손실률로만 표현하는 ETX를 개선하여, 패킷 크기와 대역폭의 영향을 반영하여 링크 대역폭의 성능을 파악할 수 있다. ETT의 수식은 아래와 같다.

$$ETT_l = ETX_l \cdot \frac{S_j}{BW_l} \quad (2)$$

S_j 는 데이터 타입 j 의 패킷 크기를 의미한다. 본 논문에서는 위성-지상 통합 네트워크 환경에서 정확한 링크 평가를 위해 이러한 ETT에 기반을 두되, 전파 지연도 고려하는 wEPTT를 고안하여 경로의 성능을 평가한다. wEPTT는 ETT와 본 논문에서 제시하는 EPT의 가중합을 통해 전송 지연과 전파 지연을 모두 고려할 수 있도록 한다.

$$wEPTT_i = \sum_{l \in P_i} (1 - \alpha) \cdot ETT_l + \alpha \cdot EPT_l \quad (3)$$

위 수식에서 α 는 ETT와 EPT의 가중치, l 은 링크, P_i 은 플로우 i 의 경로를 의미한다. 각 링크의 전파 지연을 측정하는 EPT의 수식은 다음과 같다.

$$EPT_l = ETX_l \cdot \frac{d_l}{c} \quad (4)$$

d_l 은 링크의 거리, c 는 링크의 전파 속도를 나타낸다. 이러한 wEPTT를 토대로 위성 환경에서 각 경로의 지연 시간 성능을 보다 정확하게 평가할 수 있다.

3.2 QoS 라우팅을 위한 utility 정의

각 플로우의 QoS를 고려하여 라우팅을 하기 위해서는 앞서 평가한 지연 시간 성능을 통해 특정 경로로 데이터를 보냈을 때의 플로우 만족도를 계산해야 한다^[12]. 본 논문에서는 각 플로우의 지연 시간을 개선하기 위해 wEPTT 결과를 입력으로 사용해, 아래의 utility 함수로 라우팅 경로의 만족도를 계산한다.

$$U^j(wEPTT_i) = 1 - \frac{\left(\frac{wEPTT_i}{\eta_j}\right)^{\theta_j}}{1 + \left(\frac{wEPTT_i}{\eta_j}\right)^{\theta_j}} \quad (5)$$

η_j 는 데이터 타입 j 의 플로우에서 wEPTT와 동일한 값을 가질 시 utility 함수가 절반이 되는 지점을 의미하고, θ_j 는 데이터 타입 j 의 utility 함수 감소 양상을 조절하는 파라미터를 나타낸다. 이와 같은 수식을 통해 각 데이터 타입에 따라 경로의 만족도 함수가 다르게 적용된다. 즉, η_j 와 θ_j 의 파라미터를 조정하여 지연 시간에 대한 민감도를 조절한다. 각 플로우는 wEPTT를 이용해 utility 함수가 최대의 값을 가지는 경로를 계산함으로써 지상과 위성 링크의 상태를 파악하고 플로우의 QoS를 고려하여 라우팅 경로를 결정할 수 있다.

3.3 Midpoint 기반 라우팅 알고리즘

Solver^[13]와 같은 최적화 도구를 사용해 다양한 요구 사항을 가지는 플로우들을 최적의 utility를 가지는 라우팅 경로를 선택할 경우, 복잡도가 높아진다. 이를 해결하기 위해 송신 노드 x 와 수신 노드 y 간 최단 경로를 통해 노드의 중요도를 결정하는 BC를 사용해 midpoint를 선택하여 문제 복잡도를 줄인다. BC는 다음과 같이 정의된다.

$$C(n) = \sum \frac{\sigma_{xy}(n)}{\sigma_{xy}} \quad (6)$$

n 은 토폴로지 내 노드를 의미하고 P_{xy} 는 두 노드 간의 경로 집합을 나타낸다. σ_{xy} 는 경로 내 최단 경로의 수이고, $\sigma_{xy}(n)$ 는 노드 n 이 경로 내에 포함된 횟수이다. BC는 최단 경로에 특정 노드가 몇 번 속하는지를 기준으로 노드의 중요도를 나타낸다.

그림 3의 알고리즘은 본 논문에서 제안하는 utility 기반 QoS 라우팅 알고리즘이다. 먼저, 라우팅 경로 계산 복잡도를 낮추기 위해 BC 기반으로 중요도가 높은 midpoint 노드를 선택하고 이를 지나는 라우팅 경로 후보들을 생성한다. 이후, 각 후보 경로의 지연 성능을 나타내는 wEPTT를 계산하고 이를 입력으로 사용해 플로우 만족도인 utility 함수를 계산하게 된다. 이때, 데이터 타입별로 파라미터가 다르게 설정된 utility를 계산하게 된다. 앞서 생성된 경로 후보 중 지상망을 통해 전송할 시 예상되는 utility가 가장 높은 경로를 선택하게 된다. 그리고 해당 경로를 위성망을 거쳐 데이터를

Algorithm 1 Utility-based Routing with Midpoints

Input:

Satellite Cost C
Flow Set F
Number of Midpoints k

Output:

Route for Each Flow in F

```

1: Initialize ground capacity  $G_{cap}$  and satellite capacity  $S_{cap}$ 
2: for each flow  $f$  in  $F$  do
3:   for each satellite cost  $c$  in  $C$  do
4:     Set  $S_{cap} \leftarrow c$ 
5:     for each flow  $f$  in sorted flows do
6:       Identify data type of  $f$ 
7:       Select  $k$  middle points
8:       Compute wEPTT for candidate routes
9:       Calculate utility
10:      if  $S_{cap} > 0$  and satellite utility  $>$  ground utility
11:        then
12:          Set Best route  $\leftarrow$  satellite route
13:          Update  $S_{cap} \leftarrow S_{cap} - \text{demand}$ 
14:        else if  $G_{cap} > 0$  then
15:          Set Best route  $\leftarrow$  ground route
16:          Update  $G_{cap}$ 

```

그림 3. Utility 기반 midpoint 라우팅 알고리즘
Fig. 3. Utility-based routing algorithm with midpoint selection

전송할 때 utility와 비교하여 더 높은 만족도를 가지는 경로로 데이터를 전송한다. 이 과정을 통해 제안 기법은 모든 조합의 라우팅 경로들을 계산할 필요 없이 주요 노드인 midpoint를 경유하면서 높은 utility를 갖는 경로를 선택하여 문제 복잡도를 크게 감소시킬 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 전송 지연과 전파 지연을 모두 계산하는 wEPTT와 다른 라우팅 메트릭의 성능을 비교하기 위해 파이썬을 통해 실험 환경을 구성하였다. 각 AS는 spider-web 토폴로지로 구성되며, 2개의 AS와 네트워크 내 모든 스위치와 연결된 하나의 위성 노드가 존재한

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Satellite bandwidth	100 Mbps
Ground bandwidth	10 Mbps
Satellite budget	[5, 10, 15, 20] Mbps
η_j of voice, video, data	0.01, 0.02, 0.03
θ_j of voice, video, data	2.5, 2, 1.8
S_j of voice, video, data packet	[224[14], 8800[15], 12,000] bits
Satellite altitude	1,000 km
Ground link distance	50 km

다고 가정한다. 네트워크에서는 음성, 영상, 대용량 데이터 세 가지 타입이 랜덤으로 발생하며, 각기 다른 QoS와 플로우 크기를 갖는다. 실험에 사용된 파라미터는 표 1에 정리되어 있다. 본 논문에서 제안하는 라우팅 알고리즘에 전송 지연만을 고려하는 ETT를 적용하여 wEPTT와의 성능 차이를 분석하였다. 실험은 각 기법 별로 100번씩 수행하여 평균값을 비교하였다. 또한, 위성망의 사용 가능한 대역폭 예산을 제한하여 각 라우팅 메트릭의 성능 차이를 확인하였다.

그림 4는 utility 기반 QoS 알고리즘에 각 라우팅 메트릭을 적용했을 때의 네트워크 처리량을 나타낸다. wEPTT는 다른 라우팅 메트릭에 비해 더 많은 데이터를 처리하였는데, 이는 wEPTT가 전파 지연을 고려하기 때문에 다른 라우팅 메트릭에 비해 위성망과 지상으로 데이터를 보냈을 때의 예상 경로 성능을 더 잘 계산한다는 것을 의미한다.

반면, ETT는 대역폭에 초점을 맞춰 링크를 평가하기 때문에 위성의 전파 거리를 고려하지 않아 대역폭 성능이 좋은 위성 링크로 데이터를 우선적으로 보내게 된다. wEPTT는 각 위성망 예산에 따라 ETT에 비해 8 %에서 49.7 %의 개선된 성능을 보여주었다. 이러한 링크 평가 방식의 차이는 위성망 예산을 제한적으로 이용해야 하는 상황에서 더욱 큰 네트워크 처리량 변화로 이어진다.

그림 5는 각 라우팅 메트릭별 평균 지연 시간을 나타낸다. 그림 4와 마찬가지로, wEPTT의 평균 지연 시간이 다른 메트릭에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 또한, 라우팅 메트릭에 관계없이 위성망 예산 증가에 따라 지연 시간 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 대역폭이 큰 위성망을 통해 보낼 수 있는 데이터가 증가하게 되어 네트워크 성능이 향상된 것이다. 또한, wEPTT와 다른 라우팅 메트릭과의 성능 차이 폭도 위성망 예산이 작을 때보다 클 때 더 차이가 발생하는

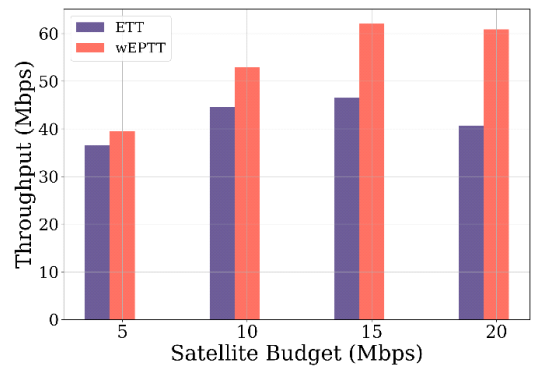


그림 4. 위성망 예산에 따른 평균 처리량
Fig. 4. Mean throughput by satellite budget

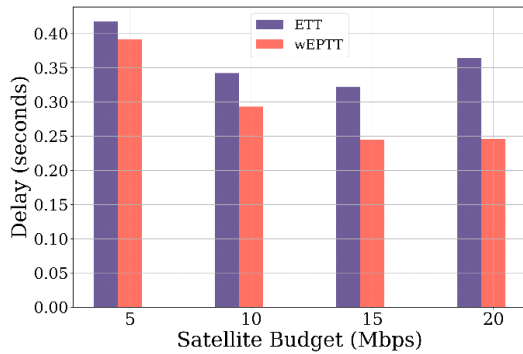


그림 5. 위성망 예산에 따른 평균 지연 시간
Fig. 5. Mean delay by satellite budget

것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 위성망 사용 시 wEPTT가 링크의 품질을 더욱 정확하게 평가해, 동일한 위성망 예산에서도 위성과 지상으로 트래픽을 적절히 분배한다는 것을 보여준다. 평균 지연 시간 측면에서 wEPTT는 ETT에 비해 6.4 %에서 32.5 %의 개선된 성능을 확인할 수 있었다.

그림 6은 wEPTT를 본 논문의 라우팅 알고리즘에 적용하였을 때의 데이터 타입별 지연 시간 성능을 나타낸다. 음성, 영상, 대용량 데이터는 각기 다른 지연 시간 QoS를 가지며, 음성, 영상, 대용량 데이터 순으로 지연 시간에 민감하다. 그림에서는 위성망 예산이 높아질수록 낮은 지연 시간 내에 전송되어야 하는 음성 데이터와 영상, 대용량 데이터의 지연 시간 성능 차가 극명해지는 것을 볼 수 있다. 이는 위성망 예산이 낮아 위성망 활용도가 낮은 상황에서는 대역폭이 낮은 지상 링크로만 데이터를 전송하여 네트워크 병목 현상이 발생했기 때문이다. 따라서 utility가 높은 경로를 선택해도 데이터 타입별 지연 시간이 큰 차이를 보이지 않는다. 반면, 위성

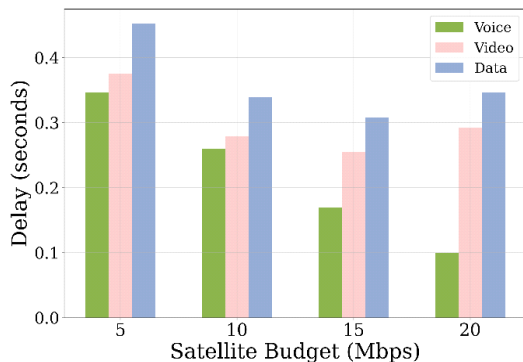


그림 6. 위성망 예산에 따른 데이터 타입별 평균 지연 시간
Fig. 6. Mean delay by satellite budget for different data type

표 2. 평균 실행 시간 (seconds)

Table 2. Mean computation time (seconds)

Budget	5 %	10 %	15 %	20 %
Scheme				
Baseline	19.318	19.304	19.299	19.293
Proposed	0.06	0.0598	0.0598	0.0598

표 3. 평균 처리량 (Mbps)

Table 3. Mean throughput (Mbps)

Budget	5 %	10 %	15 %	20 %
Scheme				
Baseline	39.402	52.802	61.938	60.839
Proposed	39.503	52.949	62.042	60.88

망 예산을 점차적으로 증가시키면서 위성 링크를 활용함에 따라 데이터 타입별 QoS를 반영하여 라우팅 경로를 지정하는 것을 볼 수 있다.

표 2와 표 3은 utility 기반 midpoint 라우팅 알고리즘과 midpoint를 사용하지 않은 baseline의 실행 시간을 비교한 결과이다. 모든 경로를 탐색해 utility가 높은 경로를 고르는 baseline보다 BC 기반으로 midpoint를 사전 결정하는 방식이 실행 시간을 단축시켰다. 또한, 평균 처리량은 baseline과 제안 기법이 유사하거나 약간 더 높은 것을 확인하였다. 이는 두 방식 모두 복잡도를 줄이기 위해 플로우 크기가 큰 순서대로 경로를 지정한다는 점에서 공통점을 가지지만, baseline은 중앙 집중적인 spider-web 토폴로지 특성상 특정 링크에 부하를 특정 링크에 부하가 집중될 가능성이 더 크기 때문으로 보인다. 반면, 제안 기법은 BC를 통해 여러 노드를 선별함으로써 부하를 보다 균형 있게 분산시킨 결과로 해석된다.

V. 결 론

위성 네트워크는 지상 네트워크의 제한된 대역폭과 커버리지를 극복할 수 있다는 점에서 차세대 네트워크 구조로 주목받고 있다. 본 논문에서는 위성-지상 통합 네트워크 환경에서 이종의 네트워크 특성을 반영하여 링크 품질을 판단하는 wEPTT를 제안하였다. 또한, wEPTT를 통해 낮은 복잡도로 QoS에 따른 라우팅 경로를 도출할 수 있도록 midpoint를 활용하는 utility 기반 QoS 라우팅 알고리즘을 제시하였다. 실험 결과, 전파 지연을 고려하지 않는 ETT 라우팅 메트릭에 비해 더 높은 네트워크 처리량과 지연 시간을 제공하는 것을 확인하였다. 이후 연구에서는 위성 간 링크를 고려한

라우팅 알고리즘을 진행해 볼 예정이다.

References

- [1] P. Öhlén, B. Skubic, A. Rostami, M. Fiorani, P. Monti, and Z. Ghebretensaé, “Data plane and control architectures for 5G transport networks,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1501-1508, Mar. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2524209>)
- [2] G. S. Kim, S. Park, J. Kim, Y. Kim, J. Ha, and B. H. Jun, “Reinforcement learning-based dynamic routing for robust optimization of low earth orbit (LEO) satellite communication networks,” *J. KICS*, vol. 48, no. 9, pp. 1123-1134, Sep. 2023.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.9.1123>)
- [3] J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah, and N. Kato, “Space-air-ground integrated network: A survey,” *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741, Fourth Quarter 2018.
(<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841996>)
- [4] Y. Shi, J. Liu, Z. M. Fadlullah, and N. Kato, “Cross-layer data delivery in satellite-aerial-terrestrial communication,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 138-143, Jul. 2018.
(<https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700354>)
- [5] Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, “Designing routing metrics for mesh networks,” in *Proc. IEEE Wkshp. Wireless Mesh Netw. (WiMesh)*, Santa Clara, USA, Sep. 2005.
- [6] S. Ahang, A. Liu, C. Han, X. Xu, X. Liang, and K. An, “GRLR: Routing with graph neural network and reinforcement learning for mega LEO satellite constellations,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 74, no. 2, pp. 3225-3237, Feb. 2025.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3471658>)
- [7] N. Torkzaban, A. Gholami, J. S. Baras, and C. Papagianni, “Joint satellite gateway placement and routing for integrated satellite-terrestrial networks,” in *Proc. IEEE ICC*, Dublin, Ireland, Jun. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149175>)
- [8] X. Masip-Bruin, et al., “Research challenges in QoS routing,” *Computer Communi.*, vol. 29, no. 5, pp. 563-581, Mar. 2006.
(<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2005.06.008>)
- [9] Y. Lyu, H. Hu, R. Fan, Z. Liu, J. An, and S. Mao, “Dynamic routing for integrated satellite-terrestrial networks: A constrained multi-agent reinforcement learning approach,” *IEEE J. Sel. Area in Commun.*, vol. 42, no. 5, pp. 1204-1218, May 2024.
(<https://doi.org/10.1109/JSAC.2024.3365869>)
- [10] G. Trimponias, Y. Xia, H. Xu, X. Wu, and Y. Geng, “Centrality-based middlepoint selection for traffic engineering with segment routing,” *arXiv preprint arXiv:1703.05907*, Mar. 2017.
(<https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.05907>)
- [11] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks,” in *Proc. MobiCom*, New York, USA, Sep. 2004.
(<https://doi.org/10.1145/1023720.1023732>)
- [12] G. Liang and H. Yu, “Network selection algorithm for heterogeneous wireless networks based on service characteristics and user preferences,” *EURASIP J. Wireless Commun. and Netw.*, vol. 2018, Oct. 2018.
(<https://doi.org/10.1186/s13638-018-1264-5>)
- [13] LLC Gurobi Optimization, *Gurobi Optimizer Reference Manual*(2019), Oct. 31, 2024, from <http://www.gurobi.com>
- [14] Cisco Systems, Inc., *TelePresence Network Systems 1.1 Design Guide*(2011), Oct. 31, 2024, from https://www.cisco.com/c/dam/en/us/td/docs/solutions/TelePresence_Network_Systems_1-1_DG.pdf
- [15] Cisco Press, *QoS Requirements for Voice, Video, and Data*(2006), Oct. 31, 2024, from <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=471096&seqNum=6>

이 상 훈 (Sanghoon Lee)



2024년 : 아주대학교 전자공학
학사
2024년~현재 : 고려대학교 전기
전자공학과 석사과정
<관심분야> 소프트웨어 정의
네트워크, P4
[ORCID:0009-0000-6996-7242]

최 흥 록 (Hongrok Choi)



2018년 : 고려대학교 전기전자
공학 학사
2018년~현재 : 고려대학교 전기
전자공학과 박사과정
<관심분야> 소프트웨어 정의
네트워크, 위성 네트워크,
머신러닝
[ORCID:0000-0001-8380-8707]

류 동 균 (Dongkyun Ryoo)



2021년 : 고려대학교 전기전자
공학 학사
2021년~현재 : 고려대학교 전기
전자공학과 박사과정
<관심분야> 5G/6G 모바일 네
트워크, 차량 네트워크, 위
성 네트워크
[ORCID:0009-0004-2192-3012]

김 하 은 (Haeun Kim)



2024년 : 고려대학교 전기전자
공학 학사
2024년~현재 : 고려대학교 전기
전자공학과 석사과정
<관심분야> 소프트웨어 정의
네트워크, P4
[ORCID:0009-0007-2836-3160]

김 준 형 (Junhyeong Kim)



2018년 : 아주대학교 소프트웨
어학 학사
2020년 : 아주대학교 컴퓨터공
학 석사
2023년~현재 : 한화시스템 선임
연구원

<관심분야> 전송통신, 다계층네트워크, Segment
Routing, AI
[ORCID:0009-0008-1268-723X]

박 진 호 (Jinho Park)



2010년 : 인제대학교 전자지능
로봇공학 학사
2020년 : 세종사이버대학교 정
보보호학 석사
2017년~현재 : 한화시스템 전문
연구원

<관심분야> 군 전송 네트워크, 보안 통신, 소프트웨
어 정의 네트워크
[ORCID:0009-0007-3686-300X]

박 현 (Hyun Park)



2005년 : 광운대학교 컴퓨터공
학부 학사
2007년 : 광운대학교 컴퓨터공
학과 석사
2010년~현재 : 한화시스템 전
문 연구원

<관심분야> 군 전송통신망, 모바일 네트워크
[ORCID:0000-0003-2643-3130]

김 기 훈 (Kihun Kim)



2002년 : 명지대학교 정보통신
공학 학사
2015년 : 아주대학교 IT융합공
학 석사
2008년~현재 : 한화시스템 수석
연구원

<관심분야> 무선통신시스템, 국방전술 네트워크,
IoT, 소프트웨어 정의 네트워크
[ORCID:0000-0002-3519-0268]

백 상 현 (Sangheon Pack)



2000년 : 서울대학교 컴퓨터공학
과 학사
2005년 : 서울대학교 컴퓨터공학
과 박사
2005~2006년 : 캐나다 워털루
대학교 Postdoctoral Fellow
2007~현재 : 고려대학교 전기전
자공학과 교수

<관심분야> 소프트웨어 정의 네트워크, P4, B5G/6G,
엣지 컴퓨팅, 차량 네트워크
[ORCID:0000-0002-1085-1568]

안 성 준 (Sungjoon Ahn)



1984년 : 연세대학교 전자공학
학사
1986년 : 연세대학교 전자공학
석사
2024년~현재 : 국방신속획득기
술연구원 책임기술원

<관심분야> 위성통신, 데이터링크, 위성데이터링크,
저궤도위성, 정지궤도위성
[ORCID:0009-0009-8169-342X]