

# 저궤도 위성 네트워크에서 배터리 방전 심도 최소화하기 위한 에너지 및 부하 인지 라우팅

김성렬\*<sup>1</sup>, 김범석\*<sup>2</sup>, 노봉수\*\*<sup>1</sup>, 한명훈\*\*<sup>2</sup>, 이헌철\*\*\*

## Energy and Load Aware Routing for Minimizing Battery Depth of Discharge in LEO Satellite Networks

Sungryul Kim\*<sup>1</sup>, Bumseok Kim\*<sup>2</sup>, Bongsoo Roh\*\*<sup>1</sup>, Myoung-Hun Han\*\*<sup>2</sup>, and Heoncheol Lee\*\*\*

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (U1237032TG)

### 요약

본 논문은 저궤도 위성 네트워크에서 위성의 배터리 방전 심도(DoD, Depth of Discharge)를 최소화하기 위한 에너지 및 트래픽 부하인지 라우팅 기법을 제안한다. 위성의 일식 상태와 최근 전송 이력을 함께 고려하여 가용 배터리 수준을 정확히 예측하며, 이를 바탕으로 전체 일식 기간 동안의 예상 에너지 소비를 반영하여 k개의 최단 경로 후보군 중 최적 경로를 선택한다. 특히, 최근 송수신 패턴을 고려하여 과도하게 사용되고 있는 위성을 경로 선택 과정에서 제외하여 네트워크 부하 균형을 개선한다. 제안된 방법은 모든 위성의 실시간 배터리 정보를 직접적으로 요구하지 않고, 예측 가능한 일식 정보를 기반으로 동작하므로 높은 실용 가능성을 갖는다. 자체 개발 시뮬레이터를 활용한 성능 평가에서 제안 기법은 비교 방법 대비 최소 잔여 배터리 수준 및 부하 균형 측면에서 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

### Abstract

This paper proposes an energy and traffic load aware routing scheme for Low Earth Orbit (LEO) satellite networks, aiming to maximize the remaining battery levels of the satellites. It predicts available battery levels by considering both eclipse status and recent transmission history, and selects the optimal path from k-shortest candidates based on the expected energy consumption during the eclipse period. In particular, incorporating recent transmission and reception logs improves enhances load balancing by excluding heavily utilized satellites from path selection. Our method, which utilizes predictable eclipse information instead of relying on real-time battery data from all satellites, offers high feasibility. Performance evaluations using the custom-developed simulator confirmed that the proposed scheme outperforms compared methods in terms of minimum residual battery level and load balancing.

### Keywords

LEO satellite networks, load balancing, energy aware routing, k-shortest path

\* 국립금오공과대학교 컴퓨터소프트웨어공학과

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0005-5218-1477>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0009-0001-5634-3227>

\*\* 국방과학연구소 선임연구원

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0001-9517-8885>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0009-0004-2571-0153>

\*\*\* 국립금오공과대학교 IT융복합공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2962-3474>

• Received: Jun. 27, 2025, Revised: Jul. 16, 2025, Accepted: Jul. 19, 2025

• Corresponding Author: Heoncheol Lee

Dept. of IT Convergence Engineering, School of Electronic Engineering Kumoh National Institute of Technology, Korea

Tel.: +82-54-478-7476, Email: hclee@kumoh.ac.kr

## 1. 서 론

저궤도 위성(LEO, Low Earth Orbit) 네트워크는 지상 통신 인프라가 제한적인 지역에서도 고속 인터넷 서비스를 제공할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 또한, 대규모 위성군(Mega constellation) 구축을 통해 전 지구적 규모의 네트워크 운용이 가능해졌으며, 최근에는 레이저 통신 기술의 발전으로 위성 간 고속 데이터 전송도 실현되고 있다. 이러한 장점으로 인해 LEO 위성 네트워크는 재난 대응, 물류 추적, 해상 및 항공 통신 등 다양한 분야에서 활용이 확대되고 있다[1]-[4].

지상 네트워크와 마찬가지로 LEO 위성 네트워크에서도 효율적인 라우팅 알고리즘은 중요한 역할을 가진다. 그러나 LEO 위성의 특성으로 인해 기존 라우팅 기법을 직접 적용하는 데에는 여러 가지 한계가 존재한다[5][6]. 특히, LEO 위성 네트워크는 토폴로지가 지속적으로 변화하기 때문에 실시간 라우팅 의사결정이 더욱 복잡하다. 또한, 레이저 기반 위성 간 링크(LISL, Laser Inter-Satellite Links)의 수가 제한적이어서 사용 가능한 라우팅 경로의 수가 적고, 이로 인해 네트워크 혼잡이 발생하기 쉽다[7].

에너지 제약 역시 주요한 고려 요소로 간주한다. 위성의 태양 전지판이 태양을 통해 에너지 공급이 가능한 경우, 수집된 에너지가 위성 운영에 사용되고 남은 에너지는 배터리에 저장된다. 반면, 위성이 지구 그림자 영역에 진입하여 태양광을 받을 수 없는 일식(Eclipse) 구간에서는 배터리 전원만으로 동작하게 된다. 이때 배터리의 최대 충·방전 주기는 방전 깊이(DoD, Depth of Discharge)가 증가할수록 감소한다. 따라서 일식 구간 동안 과도한 에너지 소비를 방지하여 낮은 DoD 수준을 유지하는 것이 중요하다[8][9].

이러한 LEO 위성 네트워크의 고유한 특성으로 인해 정교한 에너지 관리가 라우팅 설계에서 주요 목표로 고려되고 있다. E-CGR 알고리즘은 위성 간 통신 가능 시간(접속 시작 및 종료 시간)을 사전 스케줄 정보로 활용하여 에너지 고갈로 인한 전송 실패를 줄이고 위성 시스템의 수명을 연장한다[10]. 위성 광통신망에 특화된 유전자 알고리즘 기반 라

우팅 기법인 GA-EER는 기존 최단 경로 알고리즘과 달리 에너지 효율성과 네트워크 부하 균형을 동시에 고려하여 라우팅을 최적화하였다[11]. 특히, 일정 수준 이하의 최소 배터리 임계값에 도달한 위성의 전송을 억제함으로써 높은 DoD 수준을 유지하여 배터리 수명 저하를 방지한다. 한편, 최근에는 현재 배터리 상태뿐만 아니라 남은 일식 시간까지 고려하여 위성의 가용 배터리 용량을 예측하고 이를 라우팅 결정에 반영하는 연구도 제안되었다. 그러나 본 방법은 에너지 상태가 양호한 일부 위성의 과도한 사용으로 인한 네트워크 혼잡 문제가 발생하는 경향이 있다[12].

에너지 인지 라우팅에서는 현재 배터리 상태뿐만 아니라 향후 일식 구간의 지속 시간을 함께 고려하여 미래 배터리 수준을 정확히 예측하는 것이 중요하다. 이에 따라 태양 전지판 출력과 배터리 노화를 포함한 위성의 전력 사용 모델을 구성하여 에너지 효율성과 QoS(Quality of Service) 간 균형을 달성하는 방안을 제안된 바 있다[13].

대부분의 기존 배터리 상태 인지 기반 라우팅은 비일식 구간에 위치한 위성만을 우선적으로 선택하는 경향이 있어 홉(Hop) 수가 증가하고 네트워크 혼잡이 발생할 가능성이 있다. 이러한 현상은 이웃 노드 수가 제한적인 저궤도 위성 네트워크 환경에서 더욱 심화한다. 또한 대부분의 연구에서는 모든 위성의 현재 배터리 수준을 실시간으로 파악한다고 가정하지만 이를 위해선 위성 간 주기적인 메시지 교환이 필요하므로 네트워크 자원이 소모되고 오버헤드가 증가하는 문제가 발생한다.

이에 본 논문에서는 네트워크 부하 균형을 고려하면서 각 위성의 DoD를 최소화하기 위한 라우팅 기법인 ELAR(Energy and Load Aware Routing)를 제안한다. 제안 방법은 위성의 현재 배터리 상태 대신 지상 기지국에서 쉽게 획득할 수 있는 위성의 일식 정보와 라우팅에 참여한 각 위성의 송수신 이력만 활용한다. 종단 간 지연을 기준으로 k-최단 경로(K-shortest paths)를 탐색한 후, 라우팅에 참여한 위성들의 일식 종료 시점에서의 예상되는 배터리 상태를 고려하여 최종 경로를 선택한다. 특히 소비된 에너지는 물론, 남은 일식 시간 동안 예상되는 전송

횟수까지 고려하여 더욱 정확한 배터리 수준을 예측하는 동시에 트래픽이 집중된 위성의 라우팅 참여를 제한하여 부하 분산도 동시에 달성한다.

제안한 알고리즘은 자체 개발한 시뮬레이터를 통해 평가하였다. MATLAB의 위성 톨박스를 이용하여 위성 궤적을 시뮬레이션하고, 사전 정의된 네트워크 계획을 기반으로 위성 간 링크를 구성하였다. 따라서, 단순하거나 명확한 기술이 부족한 가상 토폴로지를 사용하는 기존 연구들보다 더 현실성 있는 성능 평가를 수행했다고 평가할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위성 일식이 배터리 사용에 미치는 영향을 설명하고, LEO 위성 네트워크에서 최단 경로 기반 라우팅이 혼잡 문제를 유발할 수 있음을 보이며 부하 균형의 필요성을 강조한다. 3장에서는 제안하는 에너지 및 부하 인지 라우팅 기법을 소개한다. 4장에서는 제안 기법의 성능을 평가하며, 5장에서는 본 연구를 정리하고 향후 연구 방향을 제시한다.

## II. 저궤도 위성 네트워크 분석

본 연구의 이해를 돕기 위해 먼저 위성 일식이 배터리 사용에 미치는 영향을 설명한다. 또한, 일반적인 LEO 위성 네트워크에서는 트래픽이 일부 위성에 집중되어 에너지 소비의 불균형이 발생하는 현상도 함께 분석한다.

### 2.1 위성 일식과 배터리 관계

에너지 소비는 일반적으로 위성 운용, 데이터 처리, 통신으로 구분할 수 있다. 위성은 추진, 자세 및 궤도 제어, 열 제어 등 기본 운영을 위해 지속적으로 에너지를 소비한다. 임무 수행을 위해 수집된 다양한 데이터를 처리하는 과정에서도 프로세서 구동에 따른 에너지가 필요하다. 송수신에 필요한 에너지는 통신 거리, 데이터량, 수신기 감도 등 여러 요인에 따라 달라진다.

데이터 송신 및 수신, 위성 운용과 프로세서 동작에 소비되는 에너지를 각각  $P_t$ ,  $P_r$ ,  $P_n$ 라 하면 데이터 전송을 시도하는 위성의 총 에너지 소비는 식

(1)과 같이 이들의 합으로 표현된다.

$$P_c = P_t + P_r + P_n \quad (1)$$

태양전지판의 초당 출력을  $P_{sun}$ , 배터리 최대 용량을  $C_{max}$ 일 경우, 임의의 시점  $t$ 에서 배터리 잔량  $C(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(t) = \min ( C(t-1) + P_{sun} - P_c ), C_{max} ) \quad (2)$$

여기서  $C_{max}-C(t)$ 를 방전 깊이(DoD)라 하며 이는 배터리 수명과 직접적인 연관이 있다. DoD가 클수록 배터리 재료에 가해지는 화학적 부하와 물리적 변화가 증가하여 수명이 단축된다. 따라서 DoD를 최소화하여 배터리 잔여 용량을 가능한 한 높게 유지하는 것이 중요하다.

식 (2)에서 제시한 배터리 모형화를 위해서는 태양광 발전량을 계산할 필요가 있으며 많은 에너지 인지 라우팅 관련 선행 연구들은 연구[13]에서 제시한 태양광 발전 모델을 참조한다. 해당 연구에서는 위성 고도와 태양광과 궤도면 사이의 각도에 따라 태양전지판 출력 전력이 시간에 따라 변화하는 양상을 수식화하여 출력 전력이 사인 함수 형태로 변동함을 보여주었으나, 본 연구에서는 모델의 단순화를 위해 위성이 일식 상태일 경우 출력은 0, 아닐 경우 상숫값으로 에너지 수급 상태를 모형화하였다.

위성 발사 전 적정 배터리 용량을 산출할 때 가장 중요한 요소로 평가받는 일식의 지속 시간은 위성의 고도에 따라 달라진다. 예를 들어, 고도 500 km에서는 위성의 공전 주기가 약 95분이며, 이 중 약 28분 동안 일식을 경험한다. 한편 고도 외에도 위성의 궤도 경사각(Inclination angle) 또한 일식 노출 특성에 영향을 준다. 동일 고도에 위치한 위성이라도 궤도 경사각에 따라 지구 그림자를 통과하는 거리 차이로 서로 다른 일식 특성을 나타낸다. 직관적으로 보면, 궤도 경사각이 클수록 일식 지속 시간이 짧아지는 경향이 있다. 이러한 일식 특성 차이는 위성 간 가용 에너지의 차이를 유발하므로, 저궤도 위성 네트워크에서 라우팅 알고리즘 설계 시 반드시 고려해야 할 중요한 요소이다.

저궤도 위성 네트워크에서 위성 간 일식 지속 시간의 차이를 확인하기 위해, MATLAB 툴박스를 이용하여 저궤도 위성 네트워크 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 총 12개의 궤도면(Orbital plane)

모형화하였으며, 궤도면마다 12개의 위성을 균등하게 배치하였다. 궤도면의 절반은 남서쪽에서 북동쪽으로 상승하고, 나머지 절반은 북서쪽에서 남동쪽으로 하강하는 궤도 특성을 가진다. 위성 고도는 각각 500 km와 1500 km로 설정하였다. 시뮬레이션 기간은 2027년 1월 1일부터 2027년 12월 31일까지이며, 일식 비율(Eclipse ratio)은 월 단위로 계산하였다.

그림 1에서 볼 수 있듯이, 고도별로 12월에 일식 비율의 편차가 가장 컸으며, 3월에는 가장 작았다. 특히 고도 1,500 km 시뮬레이션에서는 12월에 궤도에 따라 상당한 편차가 나타났으며, 일부 궤도에서는 위성이 거의 일식을 경험하지 않는 때도 있었다.

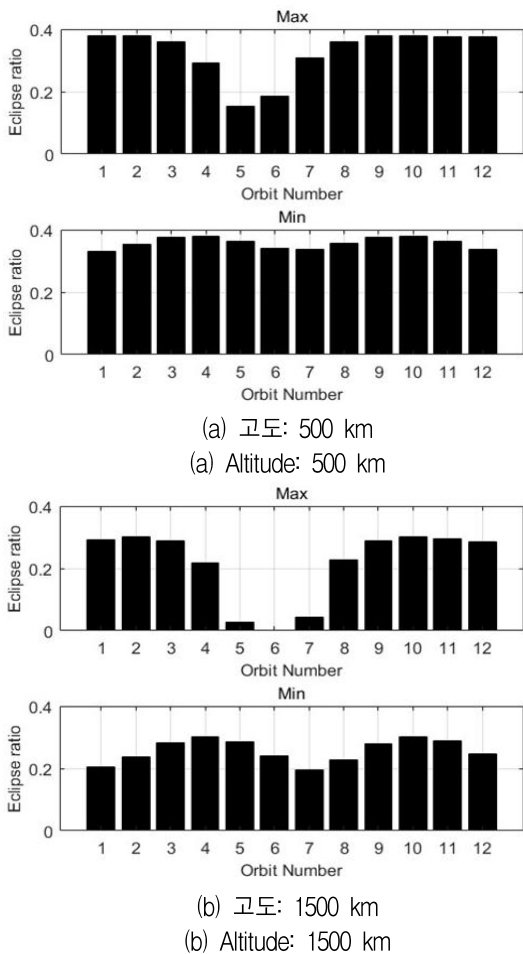


그림 1. 각 궤도에서 위성의 월평균 일식 발생률  
Fig. 1. Average monthly eclipse rate of satellites in each orbit

해당 상황에서는 일식 비율이 낮은 위성을 우선적으로 라우팅에 활용하는 것이 네트워크에 존재하는 위성들의 DoD를 높게 유지하는 데 유리하다. 또한, 곧 일식 구간에서 벗어나는 위성은 태양 전지판을 통한 에너지 수급을 재개할 수 있으므로 위성의 남은 일식 기간도 라우팅 설계 시 고려 대상이 될 수 있다.

## 2.2 네트워크 혼잡

네트워크 수명 측면에서는 배터리 수준을 고려하여 라우팅에 참여하는 위성을 선택하는 것이 효과적인 전략이지만, 제한된 수의 레이저 통신 링크를 사용하는 위성 네트워크의 특성이 혼잡을 유발할 수 있음을 반드시 인지해야 한다[14]-[16]. 예시로 스타 링크의 경우 두 개의 레이저 링크를 동일 궤도면 내에서 전후방에 있는 위성과 연결하고, 한 개 혹은 두 개의 추가 링크는 인접 궤도면의 위성과 교차 연결 용도로 사용, 즉 4개 이하의 링크를 사용한다.

또한, 레이저 통신에서는 지향(Pointing), 획득(Acquisition), 추적(Tracking)을 위한 PAT(Pointing, Acquisition, and Tracking) 과정에서 수 초에서 수십 초의 지연이 발생하고 상당한 에너지를 소비됨에 따라 한 번 맺은 링크를 상당 기간 유지한다[17]. 이러한 링크 개수의 제한과 정적인 특성에 의해 출발지부터 목적지까지 짧은 경로로 도달할 수 있는 경우의 수가 많지 않으므로 네트워크 혼잡 문제가 두드러질 수 있다. 따라서 다른 위성이 통신 거리 범위에만 존재하면 해당 위성과 데이터 전송이 가능하다고 가정하는 대부분의 저궤도 위성 라우팅 연구들에서는 이러한 실용적인 부분이 간과되었다.

트래픽이 특정 위성에 집중될 수 있음을 확인하기 위해 지리적으로 인접한 도시인 서울, 도쿄, 상하이에 위치한 지상 기지국이 뉴욕에 위치한 지상 기지국으로 데이터를 전송하는 시나리오를 모의실험하였다. 각 위성은 두 개의 동일 궤도 내의 레이저 링크와 두 개의 인접 궤도 간 레이저 링크를 사용한다고 가정하였다. 세 개의 송신 기지국이 동시에 데이터 전송을 시도할 때, 각 송신 노드는 홉 수를 기준으로 5개의 최단 경로를 계산하고 총 15개 경로에 포함된 위성을 중복성을 확인한다.

라우팅 경로에 포함된 위성들의 멀티셋(Multiset)을  $S$ , 전체 원소 수를  $|S|$ , 고유 원소 수(Unique cardinality)를  $|\text{set}(S)|$ 라 할 때, 중복 비율  $R_d$ 는 식 (3)으로 정의된다.

$$R_d = (|S| - |\text{set}(S)|) / |S| \quad (3)$$

중복 위성이 없을 경우,  $|S|$ 와  $|\text{set}(S)|$ 가 동일하므로 없으므로 식 (3)에서  $R_d$ 는 0이 된다. 반대로 중복된 위성이 많을수록  $|\text{set}(S)|$ 는 작아지며, 이에 따라  $R_d$ 는 1에 가까워진다.

그림 2는 모의실험을 통해 측정된 경로 중복 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 다수의 경로에 동일한 위성이 중복 포함되는 현상이 뚜렷하게 관찰되었으며, 평균 중복 비율은 약 46.81%로 나타났다. 이러한 높은 중복 수치는 라우팅 설계 시 부하 분산의 필요성을 시사하며, 더불어 정확한 배터리 수준 예측을 위해서는 일식 정보뿐만 아니라 송수신 과정에서 소비되는 에너지까지 함께 고려해야 함을 보여준다.

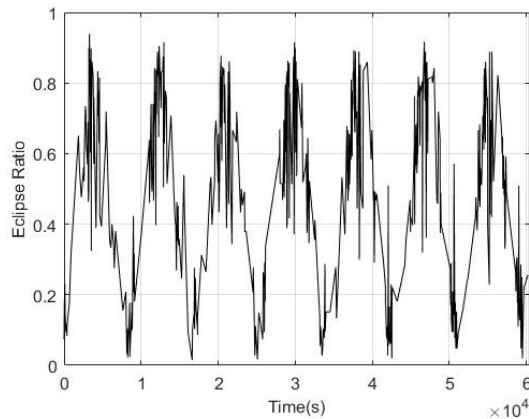


그림 2. 중복 비율  
Fig. 2. Redundant ratio

### III. 제안 방법

대부분의 라우팅 연구는 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘을 활용하여 최단 경로를 결정한다. 일반적으로 이러한 접근 방식은 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 네트워크 지표를 라우팅 비용(Cost)에 반영하여 최적 경로를 탐색하는 다목적 최

적화(Multi-Objective optimization) 방식이며, 두 번째는  $k$ 개의 최단 경로중에서 최종 라우팅 경로를 선택하는 방식이다.

다목적 최적화 방식은 많은 연구에서 채택되고 있으며, 중단 간 지연, 링크 사용률, 배터리 사용 균형 등의 비용 지표를 종합적으로 고려한다. 식 (4)는 이러한 접근법의 예로서, ECARS 알고리즘의 라우팅 비용을 나타낸 것이다[18].

$$ECARS_{x,y}(t) = \omega_1 \frac{PT_{x,y}(t) - PT_{\min}}{PT_{\max} - PT_{\min}} - \omega_2 \frac{D_{x,y}(t) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} + \omega_3 \frac{P_{x,y}(t) - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (4)$$

식 (4)에서  $PT$ ,  $D$ ,  $P$ 는 각각 위성  $x$ 와  $y$ 를 연결하는 링크의 전송지연, 잔여 에너지, 링크 용량을 의미하며,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ 은 각각 응용의 목적에 따라 조절되는 가중치다. 이러한 방식의 라우팅 비용 산출은 다양한 요구사항을 반영하는 장점이 있지만, 이를 실제 위성 시스템에 적용하기 위해서는 크게 두 가지의 현실적 어려움이 있다.

첫째, 적절한 가중치를 선정하는 것이 모호하다. 대부분의 연구에서는 가중치 값을 설정하는 명확한 기준을 제시하지 않고 있다. 또한 에너지 공급 상태와 네트워크 전체 트래픽 부하에 따라 가중치를 동적으로 조정하는 방식이 효과적이지만 이에 대한 언급이 없다. 둘째, 대부분의 에너지 인지 라우팅 알고리즘은 모든 위성의 실시간 배터리 상태가 주어지는 것으로 가정한다. 그러나 실제 시스템에서는 이러한 정보를 실시간으로 확보하기 어렵다. 위성의 잔여 에너지를 전체적으로 관리하려면 모든 위성이 주기적으로 에너지 상태 정보를 교환해야 하며, 이는 네트워크 오버헤드 증가 및 자원 소모를 초래하게 된다.

이에 본 연구에서는  $k$ -최단 경로를 활용한 라우팅 기법을 제안한다. 제안 방법은 송신 지상국은 중단 간 지연을 기준으로  $k$ 개의 최단 경로를 탐색한다. 엄밀한 중단 간 지연은 전송 지연 및 전파 지연, 대기 지연의 총합으로 산출해야 하지만 고속 데이터 전송이 가능한 저궤도 위성 네트워크의 특성

을 반영하여 신호의 전파 지연만을 중단 간 지연 요소로 간주하였다.

$k$ -최단 경로가 계산되면 각 경로에 포함된 위성 중 현재 일식 상태에 있는 위성을 식별하고, 해당 일식 구간 동안의 에너지 소비량을 추정한다. 여기서 비일식 상태의 위성은 라우팅에 참여하더라도 수집 에너지 사용으로 인해 배터리 관점에서는 영향이 없으므로 고려 대상에서 제외하였다. 경로별로 추정된 각 위성의 에너지 소비량 중 최댓값을 산출하고, 이 최댓값이 가장 작은 경로를 최종 라우팅 경로로 선택한다.

제안 방법은 일식 구간 동안의 에너지 소비량을 추정할 때 향후 예상되는 송수신 에너지 소비까지 함께 고려한다는 점이 주목할만하다. 최근 전송 횟수가 많은 위성은 향후에도 빈번한 송신이 이루어질 가능성이 커 배터리 고갈 속도가 빠를 수 있다. 이러한 위성에 에너지 불이익(Penalty)을 부여함으로써 보다 정교한 에너지 인지 라우팅이 가능하며, 동시에 최근 전송 빈도가 높은 위성의 라우팅 참여를 억제하여 부하 균형 효과도 함께 달성할 수 있다.

알고리즘의 수식적 표현에 앞서 이해를 돕기 위해 예시를 살펴본다. 표 1과 같이 출발지에서 목적지까지 도달하는 세 개의 경로가 P1, P2, P3가 있으며, 각 경로에는 일식 상태 및 비일식 상태의 위성이 포함되어 있다. 일식 구간 시작부터 종료까지의 예상 에너지 소비량은 각각 표와 같고 경로별 위성의 최대 에너지 소비는 각각 70, 80, 60이다. 이 중 최솟값은 60이므로 P3이 최종 경로로 선택된다.

표 1. 경로 선택 예시

Table 1. Example of path selection

Path	Sat ID	Expected consumption	Max.
P1	(5, 8, 10, 22)	(0, 0, 70, 60)	70
P2	(5, 9, 15)	(0, 80, 55)	80
P3	(6, 7, 10, 22)	(0, 0, 60)	60

$R_k$ 를  $k$ 개 중  $i$ 번째 최단 경로,  $s_{i,j}$ 를  $R_k$ 에 포함된  $j$ 번째 일식 상태 위성으로 정의한다. 위성  $s_{i,j}$ 의 전체 일식 기간  $T_{i,j}^e$  동안 상시 소비전력  $PN_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$PN_{i,j} = P_n T_{i,j}^e \quad (5)$$

일식 시작 시점부터 현재까지의 송신 및 수신 횟수를 각각  $N_{tx}^{i,j}$ ,  $N_{rx}^{i,j}$ 로 표기하면, 과거 일식 구간 동안 통신으로 소비된 총 에너지  $PC_{i,j}^p$ 는 식 (6)으로 표현된다.

$$PC_{i,j}^p = P_t N_{tx}^{i,j} + P_r N_{rx}^{i,j} \quad (6)$$

최근  $T_i$  검사구간 동안의 송수신 패턴이 이후에도 유사하다고 가정할 경우, 향후  $T_i$  구간 동안 통신으로 인한 예상 에너지 소비량은 다음과 같다.

$$PC_{i,j}^f = \begin{cases} T_i (\overline{P_t N_{tx}^{i,j}} + \overline{P_r N_{rx}^{i,j}}) & \text{if } T_i \geq T_{i,j}^{e,r} \\ T_{i,j}^{e,r} (\overline{P_t N_{tx}^{i,j}} + \overline{P_r N_{rx}^{i,j}}) & \text{if } T_i < T_{i,j}^{e,r} \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\overline{N_{tx}^{i,j}}$ 와  $\overline{N_{rx}^{i,j}}$ 은 각각 향후  $T_i$  동안 예상되는 위성의 평균 송수신 횟수를 의미한다.  $T_{i,j}^{e,r}$ 은 남은 위성 기간을 의미하며,  $T_{i,j}^{e,r}$ 가  $T_i$  보다 작으면 남은 위성 기간 동안만 에너지만을 소비하므로 두 경우를 구분하여  $PC_{i,j}^f$ 가 계산된다. 한편, 식 (7)에서 남은 일식 구간 전체에 대해 예상 송수신 횟수를 일괄적으로 반영하지 않는 이유는 실시간 트래픽 변동의 동적 특성을 더욱 정확히 반영하기 위함이다. 최종적으로 위성  $s_{i,j}$ 의 일식 구간 동안 예상되는 총 배터리 사용량은 다음과 같다.

$$PT_{i,j} = PN_{i,j} + PC_{i,j}^p + PC_{i,j}^f \quad (8)$$

식 (8)을 바탕으로  $i$ 번째 경로에 포함된 일식 상태의 모든 위성의 예상 소비전력 중 최대를  $PT_i^{\max}$ 로 표시하면,  $k$ 개의 최단 경로에서 선택되는 경로  $s$ 번째 경로  $R_s$ 는 식 (9)와 같다.

$$R_s \text{ where } s = \arg \min_i PT_i^{\max}, i \in 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

## IV. 성능 평가

### 4.1 환경 구성

제안한 알고리즘의 성능 평가를 위해 위성의 배터리 상태를 고려하지 않고 항상 최단 경로만을 선택하는 방식(SR, Simple Routing)과 최근 연구[12]에서 제안한 현재 배터리 수준과 남은 일식 시간을 고려하여 경로를 선택하는 방법(BEAR, Battery and Eclipse Aware Routing)을 비교 알고리즘으로 채택했다. 다만, 제안 알고리즘은 다목적 최적화 전략을 사용하지 않기 때문에, BEAR 역시  $k$ 개의 최단 경로 후보군 중 최종 경로를 선택하는 방식으로 구현하였다.

제안한 알고리즘을 보다 현실적인 환경에서 평가하기 위해 MATLAB 기반 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이션은 총 144개의 위성이 균등하게 분포된 TLE(Two-Line Element Set) 파일을 생성하는 것으로 시작된다. 네트워크는 총 12개의 궤도면(Orbit)으로 구성되며, 각 궤도면마다 12개의 위성이 포함된다. 생성된 TLE 파일은 MATLAB의 위성 툴박스를 통해 읽어 들여 위성 네트워크를 모형화하였으며, 그 예시는 그림 3에 나타내었다.

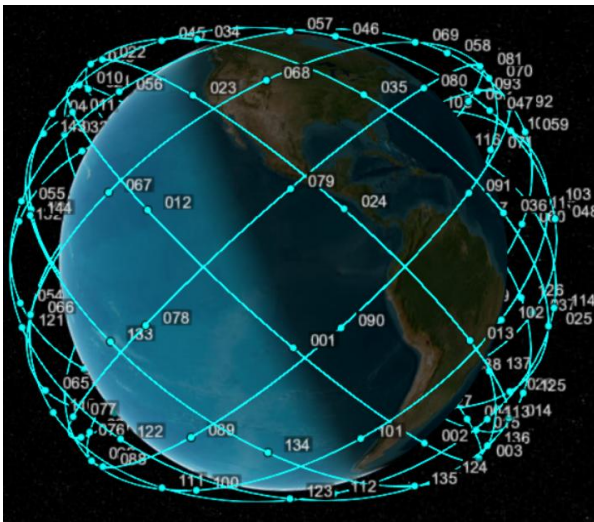


그림 3. 모의실험을 위한 저궤도 위성 네트워크  
Fig. 3. LEO satellite networks for simulation

각 위성은 4개의 레이저 링크를 탑재한 것으로 가정하였다. 이 중 2개의 레이저 링크는 동일 궤도 내 전방 및 후방 위성과 연결되며, 나머지 2개의 링크는 인접 궤도면의 위성과 연결하는 용도로 사용된다. 또한, 표 2와 같이 지상국은 총 13개 도시에 배치된 것으로 가정하였다. 시뮬레이션 수행 시 두

개의 지상국을 송신국과 수신국으로 무작위로 선택하고, 해당 지상국과 가장 가까운 두 개의 위성을 실제 라우팅 시작점과 종단점으로 선정하였다.

각 지상국은 512 MB 크기의 패킷을 전송하며, 전송 간격은 단위 시간 10초를 기준으로 평균  $\lambda$ 를 가지는 포아송(Poisson) 분포를 따르도록 모형화하였다. 전체 시뮬레이션 시간은 2시간으로 설정하였으며, 검사 구간  $T_i$ 는 100초로 지정되었다. 모의실험에 사용한 위성 에너지와 관련된 값은 표 3에 정리되어 있다.

표 2. 지상 기지국 위치  
Table 2. Location of ground stations

NewYork (40.7, -74.0)	London (51.3, 0.1)
Tokyo (35.4, 139.5)	Johannesburg (-26.2, 28.0)
Paris (48.5, 2.2)	Perth (-32.0, 115.8)
Cairo (30.0, 31.2)	BuenosAires (-34.4, -58.3)
Sydney (33.5, 151.1)	LosAngeles (34.0, -118.2)
SaoPaulo (-23.3, -46.4)	Seoul (37.6, 127.0)
ShangHai (34.5, 121.4)	

표 3. 에너지 관련 환경변수  
Table 3. Parameters related to energy

Parameter	Value
Battery capacity	80 Wh
Receiver power	0.02 W/Mbps
Transmit power	0.05 W/Mbps
Maximum charging power	400 W
Processor power	50 W
Power of other device	50 W

#### 4.2 성능 평가 결과

제안한 기법의 위성 간 배터리 사용 균등성을 검증하기 위해, 단위 시간당 평균 전송 횟수를 점진적으로 증가시키면서 네트워크 내 최소 잔여 배터리 수준을 측정하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 제안한 기법은 모든 조건에서 가장 높은 최소 잔여 배터리 수준을 유지한 반면, SR 기법은 가장 낮은 수준을 나타내었다. 또한 네트워크 트래픽 부하가 증가할수록 알고리즘 간 성능 차이는 더욱 뚜렷하게 나타났다.

특히, 트래픽 부하가 높은 상황에서 배터리 잔량이 가장 낮은 위성들의 평균 잔량을 산출한 결과 제안 방법이 SR 및 BEAR 대비 각각 17.78 Wh, 1 Wh 더 높은 배터리 잔량을 유지하였다.

주목할 점은 제안한 기법이 위성의 잔여 배터리와 같은 글로벌 상태 정보를 활용하는 BEAR과 비교하여 유사한 성능을 나타낸다는 것이다. 또한, 그림 4(c)와 같이 트래픽 부하가 높고, 전체 위성의 배터리 상태가 전반적으로 열악할수록 ELAR이 BEAR보다 높은 성능을 나타냈다. 이러한 결과는 제안한 기법이 라우팅 결정 시 최근 송수신 패킷을 반영한 데에 기인한다. 기존 방식처럼 현재 배터리 수준과 남은 일식 시간만을 고려할 경우, 최근 일식에 진입한 위성이 반복적으로 선택되어 최근 통신 부하가 간과될 수 있다. 그 결과, 특정 위성에 라우팅 작업이 집중되어 배터리 소모가 가속화될 가능성이 높다. 반면, 제안한 기법은 최근 송신 빈도가 높은 위성의 경우, 충분한 초기 배터리 잔량이 있더라도 라우팅 참여에서 제외할 수 있도록 설계되어

보다 세밀한 에너지 관리가 가능하다.

그림 5는 잔여 에너지 기준 하위 5% 위성들의 평균 배터리 수준을 나타낸다. 최소 잔여 배터리 수준을 기준으로 한 앞선 결과와 일관되게, 제안한 기법은 SR보다 높고 BEAR과 유사한 배터리 잔량을 보여준다. 이는 개별 위성 수준뿐만 아니라 네트워크 전체 차원에서도 배터리 균형(Battery balancing)을 효과적으로 달성하고 있음을 보여준다.

제안한 기법의 부하 분산 효과를 검증하기 위해, 단위 시간당 위성별 송신 횟수의 평균 표준편차를 측정하였으며, 그 결과를 그림 6 및 표 4에 제시하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 제안한 기법은 비교 방식보다 특정 위성에 트래픽이 집중되는 현상을 보다 효과적으로 완화하였다. BEAR 기법은 글로벌 배터리 상태 정보를 활용하지만, 위성 네트워크 고유의 시간적 트래픽 집중 패턴은 고려하지 않는다. 그 결과, 일식 경과 시간이 증가할수록 라우팅에 사용 가능한 위성 집합이 잔여 에너지 측면에서 제한되어 네트워크 혼잡 발생 가능성이 높아진다.

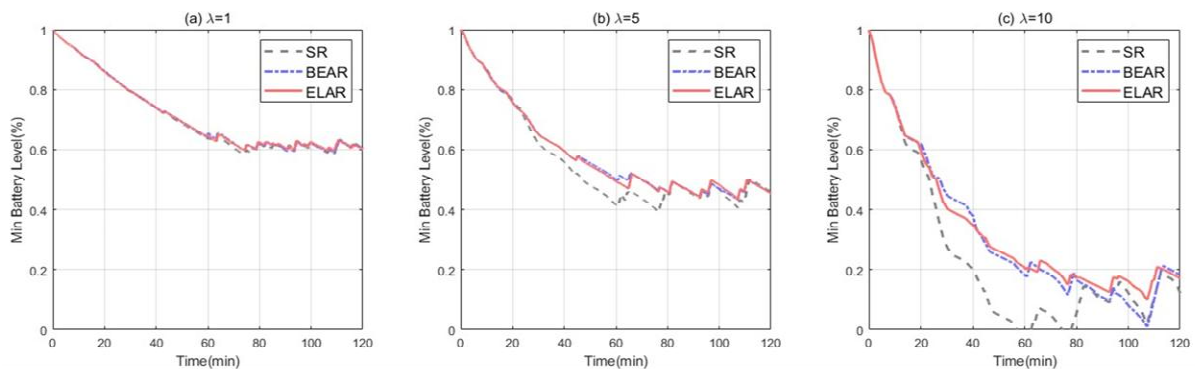


그림 4. 최소 잔여 배터리 비율  
Fig. 4. Minimum residual battery ratio

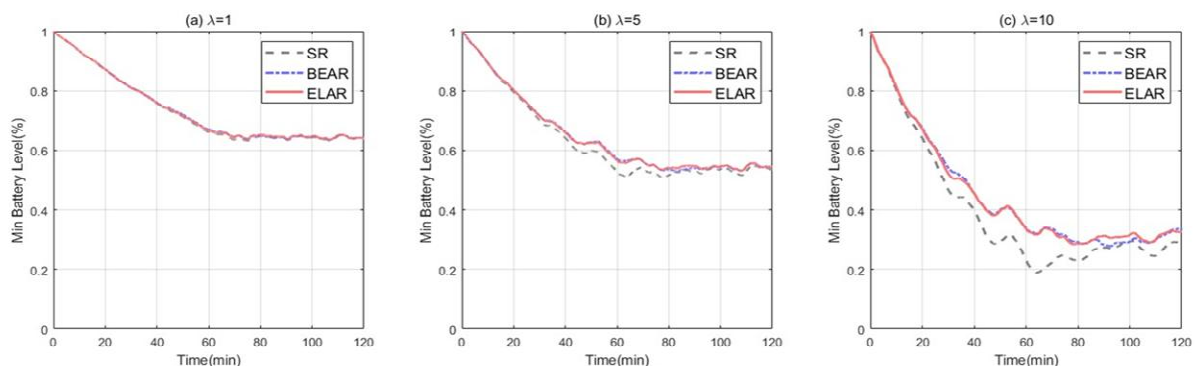


그림 5. 하위 5% 위성들의 평균 잔여 배터리 비율  
Fig. 5. Average residual battery ratio of the bottom 5% of satellites

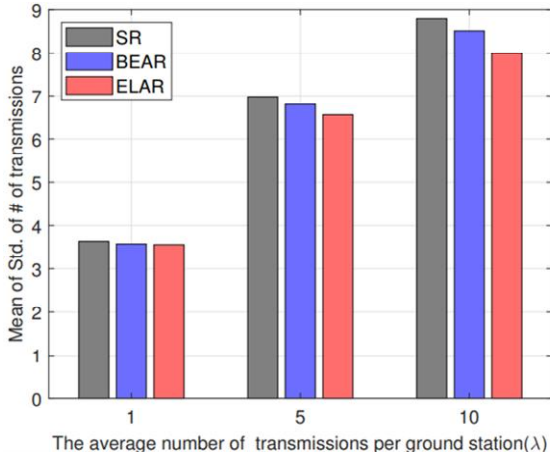


그림 6. 부하 분산 효과  
Fig. 6. Load balancing effect

표 4. 평균 전송 횟수의 분산

Table 4. Average std. of the number of transmission

$\lambda$	SR	BEAR	ELAR
1	3.636	3.576	3.561
5	6.978	6.798	6.555
10	8.798	8.515	7.998

제안한 기법은 배터리 활용도 및 부하 분산 측면에서 우수한 성능을 보이지만, 라우팅 홉 수 증가로 인한 종단 간 지연 증가라는 절충(Trade-off)가 발생할 가능성이 있다. 제안한 기법이 경로 길이에 어떤 영향을 미치는지 평가하기 위해 선택된 라우팅 경로의 평균 홉 수를 기록하였으며, 그 결과를 그림 7 및 표 5에 제시하였다.

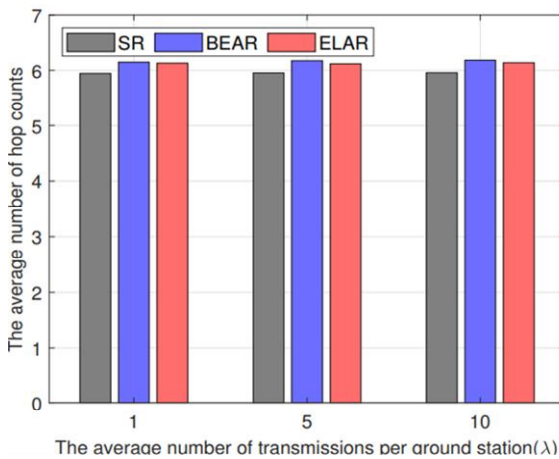


그림 7. 트래픽 부하에 따른 홉 수  
Fig. 7. Hop count with respect to the traffic load

표 5. 평균 홉 수

Table 5. Average hop count

$\lambda$	SR	BEAR	ELAR
1	5.945	6.147	6.129
5	5.954	6.175	6.118
10	5.958	6.183	6.138

결과에서 볼 수 있듯이, BEAR과 ELAR의 평균 홉 수는 SR 대비 소폭 증가하였다. 다행히 매우 높은 전파 속도 덕분에 미세한 증가는 전체 종단 간 지연에 크게 영향을 주지 않는다. 따라서 제안한 기법은 배터리 효율성과 트래픽 분산을 향상하는 동시에 추가 지연은 매우 낮은 수준에서 발생하는 실용적인 절충 관계를 보인다.

## V. 결 론

본 논문에서는 LEO 위성 네트워크에서 위성의 DoD를 최소화하여 배터리 수명을 보호하는 에너지 및 부하 인지 라우팅 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 전역 상태 정보에 의존하지 않고, 지상 기지국에서 측정, 공유가 가능할 수 있는 위성의 최근 송수신 패턴과 예측 가능한 일식 정보를 활용하여 네트워크 전반의 에너지 균형을 개선한다. 모의 실험 결과, 제안한 기법은 기존 방법 대비 최소 배터리 수준을 더욱 높게 유지하고, 트래픽 집중 현상을 완화하는 동시에 홉 수 및 종단 간 지연 증가는 매우 제한적인 수준에 그치는 것으로 확인되었다.

추가로 신뢰성 있고 현실적인 성능 평가를 위해, 실제 TLE 기반 위성 위치 계산, 궤도 배치, 동적 일식 모델링을 포함한 시뮬레이션 프레임워크를 MATLAB 툴박스를 이용해 개발했다. 이를 통해 실제 궤도 환경을 반영한 고정밀 성능 평가가 가능하였으며, 제안한 라우팅 기법의 평가 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다.

최근에는 배터리 상태뿐만 아니라 링크 용량, QoS(Quality of Service) 등 다양한 요구사항이 복합적으로 고려되는 최적화 문제를 효과적으로 해결하기 위해 심층 강화학습(DRL, Deep Reinforcement Learning) 기반의 라우팅 기법이 주목받고 있다 [19]-[21].

이에 본 연구에서도 제안한 알고리즘을 강화학습과 결합하여, 다양한 환경과 응용에 적응적으로 동작하는 라우팅 기법을 연구할 계획이다.

## References

- [1] Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, "LEO satellite constellation for Internet of Things", *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 18391-18401, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2735988>.
- [2] Q. Chen, G. Giambene, L. Yang, C. Fan, and X. Chen, "Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 70, No. 3, pp. 2743-2755, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3058126>.
- [3] T. Darwish, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu, M. Bellemare, and G. Lamontagne, "LEO satellites in 5G and beyond networks: A review from a standardization perspective", *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 35040-35060, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3162243>.
- [4] D. Zhou, M. Sheng, J. Li, and Z. Han, "Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: A survey and future challenges", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 25, No. 2, pp. 975-1019, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3245614>.
- [5] X. Cao, Y. Li, X. Xiong, and J. Wang, "Dynamic routings in satellite networks: An overview", *Sensors*, Vol. 22, No. 12, Jun. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22124552>.
- [6] R. Wang, M. A. Kishk, and M. S. Alouini, "Ultra Reliable Low Latency Routing in LEO Satellite Constellations: A Stochastic Geometry Approach", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 42, No. 5, pp. 1231-1245, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2024.3365884>.
- [7] J. Cao, S. Zhang, Q. Chen, H. Wang, M. Wang, and N. Liu, "Computing-aware routing for LEO satellite networks: A transmission and computation integration approach", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 72, No. 12, pp. 16607-16623, Jul. 2023. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3296893>.
- [8] H. Tsuchida, Y. Kawamoto, N. Kato, K. Kaneko, S. Tani, M. Hangai, and H. Aruga, "Improvement of battery lifetime based on communication resource control in low-earth-orbit satellite constellations", *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 1388-1398, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1109/TETC.2021.3087489>.
- [9] Q. Li, S. Wang, X. Ma, A. Zhou, Y. Wang, G. Huang, and X. Liu, "Battery-aware energy optimization for satellite edge computing", *IEEE Transactions on Services Computing*, Vol. 17, No. 2, pp. 437-451, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1109/TSC.2024.3359233>.
- [10] M. Marchese and F. Patrone, "E-CGR: Energy-aware contact graph routing over nanosatellite networks", *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, Vol. 4, No. 3, pp. 890-902, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2020.2978296>.
- [11] Y. Jing, Z. Yang, Y. Zhao, H. Wang, W. Wang, S. Rahman, and J. Zhang, "Energy-efficient routing based on a genetic algorithm for satellite laser communication", *Optics Express*, Vol. 31, No. 5, pp. 8682-8695, 2023. <https://doi.org/10.1364/OE.486124>
- [12] L. Yang, H. Zhang, Y. Qi, and Q. Huang, "Available energy routing algorithm considering QoS requirements for LEO satellite network", *Computer Communications*, Vol. 217, No. 1, pp. 87-96, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.01.025>.
- [13] Y. Yang, M. Xu, D. Wang, and Y. Wang, "Towards energy-efficient routing in satellite networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34, No. 12, pp. 3869-3886, Sep. 2016. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2611860>.

- [14] J. Liu, R. Luo, T. Huang, and C. Meng, "A load balancing routing strategy for LEO satellite network", IEEE Access, Vol. 8, pp. 155136-155144, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017615>.
- [15] P. He, J. Hu, X. Fan, D. Wu, R. Wang, and Y. Cui, "Load-balanced collaborative offloading for LEO satellite networks", IEEE Internet of Things Journal, Vol. 10, No. 21, pp. 19075-19086, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3280956>.
- [16] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis", IEEE vehicular technology magazine, Vol. 16, No. 2, pp. 48-56, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3063706>.
- [17] D. Bhattacharjee, P. G. Madoery, A. U. Chaudhry, H. Yanikomeroglu, G. K. Kurt, P. Hu, and S. Martel, "On-demand routing in leo mega-constellations with dynamic laser inter-satellite links", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 60, No. 5, pp. 7089-7105, Jun. 2024. <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3415571>.
- [18] R. D. N. M. Macambira, C. B. Carvalho, and J. F. de Rezende, "Energy-efficient routing in LEO satellite networks for extending satellites lifetime", Computer Communications, Vol. 195, No. 1, pp. 463-475, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.09.009>.
- [19] J. Liu, B. Zhao, Q. Xin, J. Su, and W. Ou, "DRL-ER: An intelligent energy-aware routing protocol with guaranteed delay bounds in satellite mega-constellations", IEEE Transactions on Network Science and Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 2872-2884, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2020.3039499>
- [20] D. H. Kim, M. J. Lee, H. C. Lee, D. S. Won, and M. H. Han, "Heterogeneous Processor-based Inference Parallelization for On-Board Reinforcement Learning-based Routing in Dynamic

LEO Satellite Network", Journal of KIIT, Vol. 21, No. 7, pp. 49-61, Jul. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.7.49>.

- [21] G. Wang, F. Yang, J. Song, and Z. Han, "Optimization for Dynamic Laser Inter-Satellite Link Scheduling with Routing: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach", IEEE Transactions on Communications, Vol. 72, No. 5, pp. 2762-2778, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3347775>.

### 저자소개

김 성 렬 (Sungryul Kim)



2010년 2월 : 부산대학교  
컴퓨터공학과(학사)  
2017년 8월 : 부산대학교 대학원  
컴퓨터공학과(공학박사)  
2019년 3월 ~ 현재 :  
국립금오공과대학교  
컴퓨터소프트웨어공학과 조교수

관심분야 : 빅데이터, 머신러닝

김 범 석 (Beomseok Kim)



2025년 2월 : 금오공과대학교  
소프트웨어공학과(학사)  
2025년 3월 ~ 현재 :  
금오공과대학교 대학원  
소프트웨어공학과 석사과정  
관심분야 : 그래프 신경망,  
강화학습

노 봉 수 (Bongsoo Roh)



2004년 2월 : 한양대학교  
전자전기공학부(공학사)  
2006년 2월 : 포항공과대학교  
컴퓨터공학과(공학석사)  
2021년 8월 : 충남대학교  
컴퓨터공학과(공학박사)  
2006년 4월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원  
관심분야 : 네트워크, 인공지능, 다층위성

한 명 훈 (Myoung-Hun Han)



2007년 2월 : 중앙대학교

컴퓨터공학(공학사)

2009년 8월 : 중앙대학교

컴퓨터공학(공학석사)

2021년 8월 : 중앙대학교

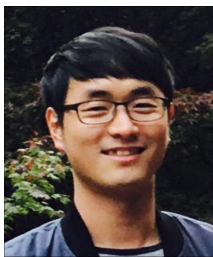
컴퓨터공학(공학박사)

2014년 10월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 네트워크, M&S, LEO, 인공지능

이 헌 철 (Heoncheol Lee)



2006년 8월 : 경북대학교

전자전기컴퓨터학부(공학사)

2008년 8월 : 서울대학교

전기컴퓨터공학과(공학석사)

2013년 8월 : 서울대학교

전기컴퓨터공학과(공학박사)

2013년 9월 ~ 2019년 2월 :

국방과학연구소 선임연구원

2019년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부

IT융복합공학과 조교수

관심분야 : SLAM, 자율주행, 인공지능, 알고리즘 가속