

저전력/고성능 Edge AI 위성 탑재체 개념 연구

이용민, 장동필

한국전자통신연구원 위성탑재체연구실

ymlee01@etri.re.kr, dpjang@etri.re.kr

A Study on the Concept of Low-power, High-performance On-board Edge AI Payload for Satellites

Yong-Min Lee, Dong-Pil Jang

Satellite Payload Research Section

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

요약

본 논문은 통신 효율, 위성체 운용 자율성, 임무 효율성 등을 향상시킬 수 있는 저전력, 고성능 Edge AI 위성 탑재체의 개념적 접근에 관한 것으로 구체적으로는 데이터 절감 및 전송효율 증대, 지능형 지구관측, 통신 네트워크 효율과 신호 품질 향상, 대형 AI 모델의 분산 처리, 탑재체 내 자율 이상 감지 및 대응, 다층 위성망 구조에서의 복원력 강화, 저궤도 위성군을 활용한 협업 탐지 및 강화학습 기반의 의사결정 등의 가능성을 제시하였다.

I. 서론

저궤도 위성 시장 규모는 2025년 기준 약 110조원 규모에서 2032년에는 약 160조원 이상으로 빠르게 성장하고 있으며[1], 5G 기반의 OneWeb 위성 한 기당 최대 전송용량은 약 7.5 Gbps이고 Starlink 저궤도 위성의 경우 수백 Mbps 수준의 다운링크 속도를 제공하고 있다[2]. Edge AI 탑재체 기술은 위성 자체에서 실시간 데이터를 통하여 지구로 전송되는 데이터량과 지연의 최소화를 비롯하여 통신 최적화 및 분산 처리, 자율 이상 감지 및 대응, 다층 구조 기반의 복원력 강화 등을 통해 위성 수명 연장 및 위성망의 강건함을 높이는 등 다양한 장점을 가지고 있다.

II. 저전력, 고성능 Edge AI 위성 탑재체

1. 데이터량 축소 및 전송효율 향상

Edge AI 위성 탑재체의 효율성 극대화 가능성 중의 하나는 EO/IR과 같은 광학탑재체와 합성개구레이더(SAR) 탑재체 등에서 생성되는 대량의 이미지 데이터를 온보드에서 선별, 정제, 압축하여 전송함으로써 지구국 전송을 위한 데이터량을 효과적으로 줄일 수 있다[3]. 예를 들어 광학 탑재체에서 주기적으로 수집한 이미지 중에서 구름 낀 영상과 같이 불필요한 영상 데이터는 AI를 통해 제외함으로써 전송효율을 높일 수 있다.

2. 지능형 지구관측

지구관측 위성에 온보드 AI 기술을 적용할 경우 탑재체 내에서 실시간 이미지 분석이 가능할 뿐만 아니라 이상 탐지가 가능하여 미리 설정된 기준에 따라 이벤트 정보만 수집하여 저전력 채널로 즉각적인 지구 전송이 가능하다[4].

3. 통신 최적화 및 분산 처리 기능

탑재체 내의 신경망 기반 모델을 사용함으로써 무선 주파수 자원관리, 적

용형 빔포밍 등 네트워크 효율과 신호 품질을 향상시킬 수 있다[5]. 또한 대형 AI 모델을 적절히 분할한 후 광학 ISL(Inter-Satellite Links) 등을 이용해 위성 간 네트워크에 분산 배치하고, 계산량이 큰 인코더는 지상 클라우드를 사용하는 것을 고려할 수 있다[6].

4. 자율 이상 감지 및 대응

FPGA 기반 엣지 컴퓨팅 (Edge-computing) 기술을 이용하여 열화상 카메라가 특정 전자회로 또는 탑재체 영역을 촬영하여 열 분포 이미지를 수집하고 지상에서 학습된 SVM(Support Vector Machine) 머신러닝 알고리즘을 FPGA에 구현, 이미지 특징을 추출하고 열 분포 패턴을 분석하여 이상 여부를 분류할 수 있다[7]. 이와 같은 탑재체 내 자율 열적 이상 조기 감지는 하드웨어의 심각한 손상을 사전에 방지하고 위성 수명을 연장하는 효과가 있다.

5. 다층 구조 기반의 복원력 강화

위성 네트워크는 다양한 궤도(LEO, MEO, GEO)를 포함하는 다층 구조를 통해 상호 보완적 작동이 가능하며, 한 궤도의 위성에 문제가 생겨도 다른 레이어를 통해 서비스 연속성을 유지할 수 있다[8]. 예를 들어, LEO의 고속 전송 채널에 문제가 발생한 경우, GEO 또는 MEO 위성이 통신 보조 역할을 수행할 수 있는데 이때 AI가 실시간으로 여러 궤도 간 신호 품질과 라우팅을 분석하여 자동 전환함으로써 네트워크의 복원력을 높일 수 있다.

6. 협업 탐지 및 강화학습 기반 의사결정

여러 대의 LEO 위성이 공동으로 딥러닝 기반의 물체 탐지를 수행하고 각 위성의 탐지 시점(viewpoint)을 최적화함으로써 탐지 정확도를 높일 수 있다[9]. 또한 강화학습을 통해 위성군 및 지상의 센서를 연결하여 위

성체가 실시간으로 충돌 회피 기동을 결정하거나 다른 위성에 실시간 임무를 전달하는 자동 전환식 관촬 및 연계(tipping and queueing) 방식의 AI 오케스트레이션 시스템 구현이 가능하다.

III. 결론

본 논문에서는 저전력/고성능 Edge AI의 위성 탑재를 통해 통신 부담의 감소 및 임무 효율성을 증대, 지능형 지구관측, 통신 최적화 및 분산 처리, 위성체 내 자율 이상 감지 및 대응, 다층 구조 기반의 복원력 강화, 협업 탐지 및 강화학습 기반 의사결정 등의 가능성을 언급하였다. 그러나 저전력·고성능 처리 능력을 갖춘 AI 프로세서의 극한 온도변화, 방사선 등 가혹한 우주 환경에서 견딜 수 있는 내성 강화와 데이터 분포 변화, 센서 드리프트(sensor drift), 결함 예측(fault detection) 등 데이터 처리 안정성 확보가 중요한 기술적 과제라고 할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 과학기술정보통신부, 해양경찰청, 환경부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아수행된 연구임 (No.2021-0-01715, 정지제도 공공복합통신위성 통신탑재체 개발)

참 고 문 헌

- [1] https://www.fortunebusinessinsights.com/leo-satellite-market-112113?utm_source=chatgpt.com
- [2] https://www.researchgate.net/publication/375101582_Free_Space_Optical_Communication_An_Enabling_Backhaul_Technology_for_6G_Non-Terrestrial_Networks?utm_source=chatgpt.com
- [3] https://cavuaerospace.uk/articles/the-demands-of-space-edge-computing/?utm_source=chatgpt.com "The Demands of Space Edge Computing - CAVU Aerospace UK Ltd"
- [4] https://satellogic.com/2025/03/20/pushing-intelligence-to-the-edge-satellogics-vision-for-ai-powered-earth-observation/?utm_source=chatgpt.com "Pushing Intelligence to the Edge: Satellogic's Vision for AI-Powered Earth Observation - Satellogic"
- [5] https://arxiv.org/abs/2308.11152?utm_source=chatgpt.com, "Energy-Efficient On-Board Radio Resource Management for Satellite Communications via Neuromorphic Computing"
- [6] https://arxiv.org/abs/2504.01676?utm_source=chatgpt.com "Satellite Edge Artificial Intelligence with Large Models: Architectures and Technologies"
- [7] https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027311772500002X?utm_source=chatgpt.com, "Edge computing in space: Design of an FPGA architecture for thermal anomaly detection based on a machine learning approach - ScienceDirect"
- [8] https://www.itweb.co.za/article/multi-layered-satellite-solutions-are-now-required/G98YdMLG8JB7X2PD?utm_source=chatgpt.com, "Multi-layered satellite solutions are now required". 2024.10.
- [9] https://arxiv.org/abs/2508.00755?utm_source=chatgpt.com, "AI-Driven Collaborative Satellite Object Detection for Space Sustainability", 2025.8.