

저궤도 위성 - 지상 통합 네트워크 아키텍처에서의 엣지 컴퓨팅을 위한 동적 오프로딩 최적화

김정환, 함동호, 김태연, 박정호
대구경북과학기술원

(ghks9876, dhham97, kim77ty, jeongho.kwak)@dgist.ac.kr

Dynamic Offloading Optimization for Edge Computing in LEO Satellite-Ground Integrated Network Architecture

Jeonghwan Kim, Dongho Ham, Taeyeoun Kim, and Jeongho Kwak
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology

요약

장소와 상황에 구애받지 않는 통신 서비스를 위해 저궤도 위성을 이용한 위성 통신이 최근 몇 년간 각광받고 있다. 요즘엔 통신 서비스 뿐만 아니라 효율적인 데이터 처리 및 전송을 위해 저궤도 위성 에 엣지 컴퓨팅 모델을 접목한 연구도 활발히 진행 중이다. 다만 현재의 저궤도 위성 엣지 컴퓨팅 연구들은 위성과 지상 간의 거리를 고정시켜 놓는 등 저궤도 위성의 모빌리티를 명확히 고려하지 않아 현실성이 떨어지는 문제가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자 저궤도 위성 - 지상 통합 네트워크 엣지 컴퓨팅 아키텍처를 제시함과 동시에 위성의 모빌리티를 고려한 동적인 최적화 방법을 제안한다.

1. 서론

최근 4G와 5G를 거치면서 모바일 셀룰러 네트워크 기술이 비약적으로 발전해왔다. 하지만 이런 기술을 사용할 수 있는 곳은 기술 발전의 혜택을 누릴 수 있는 지역에 한해서다. 현재 전체 인구의 절반 이상이 하이퀄리티 인터넷 서비스를 제대로 누리지 못하고 있어, 기술의 발전과 보급의 균형을 고려해야 한다는 의견이 많이 제시되고 있다 [1]. 이를 위한 해결책으로 위성통신이 채택되고 있는데, 특히 저궤도 위성을 이용하면 저지연성을 갖춘 인터넷 서비스를 제공할 수 있다. 급격한 디바이스의 발전으로 복잡한 태스크를 처리하는 어플리케이션 또한 많이 등장했는데, 이를 전부 모바일 내에서 해결하기엔 에너지 소모의 문제가 있다. 특히 위성 통신을 사용해야 하는 환경에서는 에너지 문제가 더 크게 다가올 것은 자명한 사실이다. 따라서 기존의 엣지 컴퓨팅 기술을 저궤도 위성 에 접목한 저궤도 위성 엣지 컴퓨팅 연구 또한 위성 통신 서비스 연구와 함께 진행되고 있는 상황이다 [2]. 다만 현재 저궤도 위성 엣지 컴퓨팅 연구들은 위치가 계속하여 변하는 위성의 모빌리티를 명확히 고려하지 않아 현실적인 시나리오라고 할 수 없다. 보다 현실적인 문제 해결을 위해 본 논문에서는 저궤도 위성 - 지상 통합 네트워크 엣지 컴퓨팅 아키텍처를 제시하고, 동시에 위성의 모빌리티를 고려한 동적인 최적화 방법을 제안한다.

II. 시스템 모델링

본 논문에서 제시하는 저궤도 위성 - 지상 통합 네트워크 아키텍처는 그림 1과 같다. 계산 복잡도의 최소화를 위해 단일 유저 - 단일 위성의 간단한 모델을 고려한다. 유저는 일정 이상의 인터넷 서비스 품질을 보장받지 못하는 고립된 지역에 존재하고, 그 근방을

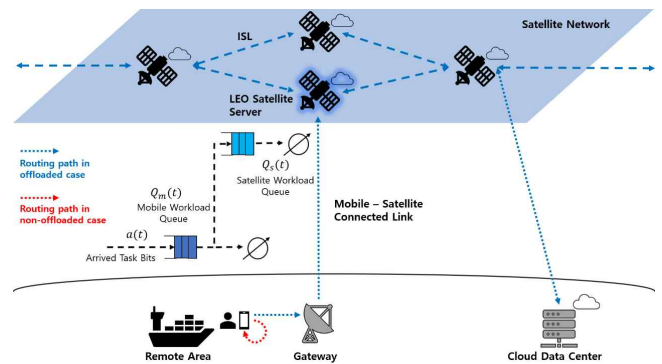


그림 1. 저궤도 위성 - 지상 통합 네트워크 아키텍처

커버하고 있는 고도 550km 의 LEO 위성이라고 가정한다. 위성의 움직임을 고려하여 매 시간 달라지는 위성 - 유저 간 거리를 모델링하고 요청된 순서대로 처리되는 데이터의 특징을 나타내기 위해 큐잉 모델 (Queueing Model)을 채택했다. 처리 요청이 들어오는 데이터들이 모바일 워크로드 큐 (Workload Queue)에 순차적으로 쌓이게 되고 최적화 알고리즘을 통해 결정되는 데이터 처리 장소에 따라 들어온 순서대로 빠져나가게 된다. 매 시간 최적화 알고리즘을 통해 유저는 위성으로 오프로딩하여 데이터를 처리할 지 로컬에서 자체적으로 처리할 지 동적으로 결정하게 된다. 오프로딩하는 경우에 유저는 근방의 게이트웨이를 통해 데이터를 연결된 위성의 서버로 전송한다. 일정 시간이 지나 연결된 위성이 커버 범위를 벗어나게 되면 연결을 끊고, 동일 궤도의 인접한 위성 과 새롭게 연결하게 된다. 이전 위성에서 처리 중이던 데이터, 즉 쌓여있던 큐는 위성 간의 Inter-Satellite Link (ISL)을 통해 새롭게 연결하는 위성으로 옮겨지게 된다. 이 때, 두 가지 가정을 하게 된다. 첫 째는 ISL의 데이터 전송 속도가 매우 빨라 큐가 옮겨지는데 걸리는 지연시간이 무시할

정도로 작다는 것, 둘 째는 새롭게 연결되는 위성의 워크로드 큐가 비워져 있다는 것이다 (단일 유저 - 단일 위성의 간단한 모델이라 가능). 오프로딩을 하지 않아 로컬에서 처리를 마친 데이터도 위성으로 전송하게 되는데, 이후 ISL을 통해 목적지인 가까운 클라우드 데이터 센터로 옮겨지게 된다. 처리를 마친 데이터의 크기는 매우 작아 처리 과정에서 소모되는 파워와 지연시간은 무시할 만하다고 가정한다.

III. 문제 정의

정의한 시나리오 상에서 우리가 최소화하고자 하는 목표 함수는 다음과 같다.

$$\min_{(\theta, c_u, c_s)} (J \cdot \overline{L_{sys}} + \overline{P_{sys}}) \quad (1)$$

$\overline{L_{sys}}$, $\overline{P_{sys}}$ 는 차례대로 시스템의 지연시간과 소모 파워이다. J 는 시스템 지연시간과 소모 파워 사이의 계수값이며 우리가 컨트롤하는 파라미터는 θ, c_u, c_s 3가지다. 차례대로 0과 1의 값을 가지는 오프로딩 파라미터, 유저와 위성의 CPU clock speed 이다. 시간 t 에서의 시스템 지연시간과 소모 파워 식은 다음과 같이 정의된다.

$$L_{sys}(t) = \frac{2d(t)\theta(t)}{c} \quad (2)$$

$$P_{sys}(t) = (P_u^c(t) + \theta(t)p_u^T(t) + wP_s^c(t)) \quad (3)$$

$d(t)$ 와 c 는 시간 t 에서의 유저위성 사이 거리 (km), 빛의 속력 (km)이고, $P_u^c(t)$, $p_u^T(t)$, $P_s^c(t)$, w 는 차례대로 시간 t 에서의 유저의 CPU 소모 파워, 전송 파워, 위성에서의 CPU 소모 파워, 상수이다.

IV. 제안된 알고리즘

고안한 알고리즘의 순서도는 그림 2와 같다. 매 시간 인풋 파라미터를 받아 Lyapunov 최적화 기법을 사용하여 데이터 처리 장소에 따른 최솟값 두 개를 도출한다 [3]. 이후 최솟값의 비교를 통해 오프로딩 여부를 결정하고 결과에 따라 다음 시간의 인풋 파라미터로 들어갈 큐 값을 업데이트한다.

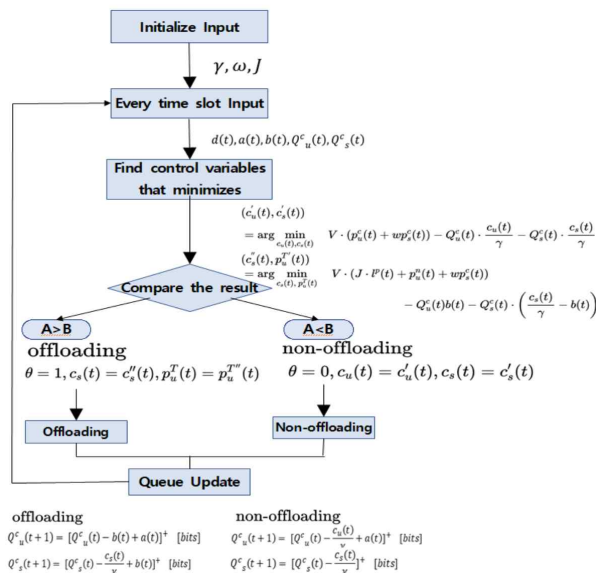


그림 2. 동적 최적화 알고리즘 순서도

이후 전체 시간동안 이 과정을 반복한다.

V. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 - 지상 통합 네트워크 엣지 컴퓨팅 아키텍처를 제시하였다. 또한 시나리오 상에서의 지연시간과 소모 파워를 최소화하는 목적함수를 정의하였고 이를 해결하기 위해 Lyapunov 최적화 기법을 적용한 알고리즘을 고안하였다. 향후 연구는 단일 유저 - 단일 위성의 간단한 현재 시스템 모델을 멀티 유저 - 멀티 위성의 환경으로 확장시켜 더 현실적인 상황을 구현하고자 한다. 또한 확장한 모델을 알고리즘대로 시뮬레이션 환경을 구성 후 동작하여 시간에 따른 큐의 길이와 목적함수 값을 도출할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음"

(IITP-2022-2018-0-01424)

참 고 문 헌

- [1] T. Azzarelli, "Onweb global access," in *Proc. Global Conf. Space Inf. Soc. (GLIS)*, Jun. 2016, pp. 1-24.
- [2] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, and K. B. Letaief, "A survey on mobile edge computing: The communication perspective," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2322-2358, 4th Quart. 2017.
- [3] M. Neely, "Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems," in *Synthesis Lectures on Communication Networks*. San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2010, pp. 1-211.