

위성-공중-지상 통합 네트워크에서 센싱 데이터 처리를 위한 리아프노프 최적화 기반 엣지 컴퓨팅 오프로딩

이현진, 이인규
고려대학교 전자전기공학과

{hjin7167, inkyu}@korea.ac.kr

Lyapunov Optimization-Based Edge Computing Offloading for Sensing Data Processing in Space-Air-Ground Integrated Networks (SAGIN)

Hyunjin Lee, and Inkyu Lee
School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

본 논문은 위성-공중-지상 통합 네트워크 환경에서 GUE의 효율적인 센싱 데이터 처리를 위해 리아프노프 최적화 기반의 동적 오프로딩 기법을 제안한다. 논문은 GUE-HAP-LEO 3 계층 네트워크 환경에서 실시간 큐 상태와 채널 환경을 고려한 오프로딩을 수행함으로써, 트래픽 과부하 상황에서도 시스템의 큐 안정성을 극대화함을 입증하였다.

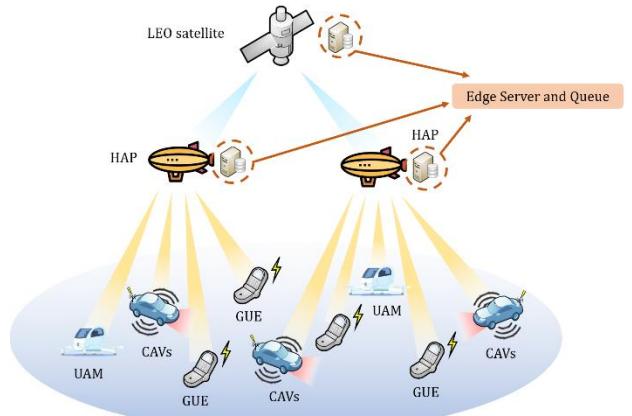
I. 서론

최근 6G와 IoT 기술의 발전으로 자율주행 차량(CAVs) 및 도심 항공 모빌리티(UAM)와 같은 미래형 모빌리티 서비스가 급증하면서, 대용량 멀티센싱 데이터의 실시간 처리를 보장하는 초저지연성 및 안정성이 핵심 요구사항으로 대두되고 있다. 그러나 지상 단말(GUE)의 제한된 지원으로는 이를 감당하기 어려워, 광범위한 커버리지와 유연한 엣지 컴퓨팅 지원을 제공하는 위성-공중-지상 통합 네트워크(SAGIN)가 핵심 대안으로 주목받고 있다 [1][2]. 다만 SAGIN 환경은 네트워크의 동적 변화로 인해 오프로딩 결정이 복잡하며, 기존의 Greedy 방식이나 전수 오프로딩 기법은 큐 안정성 저하나 과도한 에너지 소모와 같은 한계를 보인다.

따라서 본 논문에서는 CAVs 및 UAM 같은 GUE에서 수집된 멀티센싱 데이터를 HAP 및 LEO에 지능적으로 오프로딩하여, 연산 효율성과 통신 품질을 동시에 향상시키는 기술을 제안한다. 3 계층 네트워크 (GUE-HAP-LEO) 모델에서 리아프노프 최적화(Lyapunov Optimization)를 적용하여, 실시간 큐 상태와 채널 환경에 따라 오프로딩 여부를 동적으로 결정한다. 이를 통해 시스템의 큐 안정성을 보장하여 센서 데이터 처리의 신뢰성을 확보하는 동시에, 불필요한 에너지 소비를 최소화하는 최적의 오프로딩 전략을 제시한다.

II. 본론

본 논문 GUE-HAP-LEO 가 있는 3 계층 네트워크 SAGIN 시스템을 고려한다. 여기서 GUE 들은 매 타임 슬롯 t 마다 멀티센싱 데이터를 생성한다.



<그림 1>: 위성-공중-지상 통합 네트워크(SAGIN) 모델

통신 및 연산 모델은 선행 연구 [3]의 수식을 참조하여 정의하였다. GUE와 HAP 간의 채널은 Rician 페이딩을, HAP와 LEO 간의 채널은 대기 손실을 포함한 자유 공간 경로 손실 모델을 따른다. 또한, 데이터 처리에 소요되는 에너지 소비 모델은 [3]과 동일하게 CPU 주파수 f 의 제곱에 비례하는 $E \propto \kappa f^2$ 로 정의하여 반영하였다.

GUE n 의 데이터 큐(Queue) 길이를 $Q_n(t)$ 라 할 때, 큐의 동적 변화는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$Q_n(t+1) = \max(Q_n(t) - \mu_n(t), 0) + A_n(t)$$

여기서 $A_n(t)$ 는 슬롯 t 에 발생하는 데이터 도착량을 의미하며, $\mu_n(t)$ 는 선택된 오프로딩 모드(GUE, HAP, LEO)에 따른 데이터 처리율을 나타낸다. 시스템의 목표는 모든 GUE의 큐 안정성(Queue Stability)을 보장하면서, 시간 평균 에너지 소비를 최소화하는 것이다. 그러나 해당 문제는 큐 상태와 채널 환경의 확률적 특성으로 인해 직접적인 최적해를 구하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 매 타임 슬롯마다 큐 안정성과 에너지

최소화 간의 트레이드오프를 조절하는 리아프노프 최적화(Lyapunov Optimization) [4]를 적용하여 문제를 해결하였다.

본 논문에서는 큐 안정성을 나타내는 리아프노프 함수 $L(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N Q_n(t)^2$ 를 정의하고, 매 슬롯마다 Drift-plus-Penalty 항을 최소화하는 제어 방식을 채택한다. 이는 최종적으로 다음의 목적 함수를 최소화하는 문제로 귀결된다.

$$\text{minimize } V \cdot E_{\text{total}}(t) - \sum_{n=1}^N Q_n(t) \cdot \mu_n(t)$$

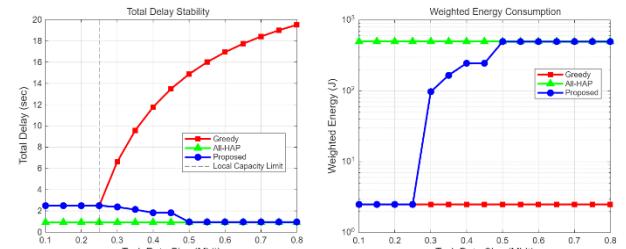
여기서 V 는 에너지 소비와 큐 안정성 사이의 가중치를 조절하는 제어 파라미터이며, $E_{\text{total}}(t)$ 는 해당 슬롯의 총 에너지 소비량이다. 이 제어 식에 따르면, 큐 길이 $Q_n(t)$ 가 커질수록(지연 위험 증가) 두 번째 항의 가중치가 커져, 에너지 소모 $E_{\text{total}}(t)$ 가 크더라도 처리율 $\mu_n(t)$ 가 높은 HAP 또는 LEO 오프로딩을 선택하게 된다. 반대로 큐가 짧을 때는 에너지 소모가 적은 로컬 처리를 우선시하여 시스템의 최적 균형점을 능동적으로 탐색한다.

본 논문에서는 제안 기법의 성능 검증을 위해 MATLAB 을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 주요 환경 및 파라미터는 관련 연구 [3]의 설정을 참조하였으며, 이에 따라 GUE 의 수는 30 개, HAP 와 LEO 의 고도는 각각 20km, 200km 로 설정하였다. 실험에서는 테스크 데이터 크기를 0.1 Mbit 에서 0.8 Mbit 까지 변화시키며 성능을 비교 분석하였다. 비교 기법으로는 모든 작업을 로컬에서 처리 시도하는 Greedy 기법과 모든 작업을 HAP 로 오프로딩하는 All-HAP 기법을 사용하였다.

시뮬레이션 결과는 기존 기법들의 한계와 제안 기법의 우수성을 명확히 보여준다. 먼저 <그림 2>의 지연 시간 안정성 측면을 살펴보면, Greedy 기법은 로컬 처리 용량의 물리적 한계점인 0.25 Mbit 를 초과하는 순간 지연 시간이 기하급수적으로 폭증함을 확인할 수 있다. 이는 트래픽 과부하 시 데이터 큐(Queue)가 발산하여 시스템이 붕괴됨을 의미하며, 결과적으로 Greedy 기법은 고신뢰성을 요구하는 센서 데이터 처리 환경에서 실현 불가능한 솔루션임을 시사한다. 반면, All-HAP 기법은 모든 테스크를 HAP 로 오프로딩함으로써 지연 시간 제약은 만족시키지만, <그림 2>의 에너지 소비 그래프에서 확인할 수 있듯이 막대한 에너지 오버헤드를 발생시킨다. 로그 스케일 상에서도 제안 기법 대비 수백 배 이상의 에너지를 지속적으로 소모하는 이러한 방식은, 배터리 용량이 제한적인 GUE(CAVs, UAM) 환경에서 지속 불가능한 방식이다.

반면, 제안하는 리아프노프 최적화 기법은 두 비교 기법의 한계를 동시에 극복하며 에너지 효율성과 시스템 안정성 간의 최적 트레이드 오프를 달성하였다. 제안 기법은 <그림 2>의 지연 시간 안정성 그래프와 같이 트래픽이 로컬 용량을 초과하는 구간에서도 큐 길이를 기반으로 즉각적인 오프로딩을 수행하여 All-HAP 기법과 동등한 수준의 초저지연 안정성을 확보하였다. 동시에 무조건적인 전송을 지양하고 큐 안정성에 필요한 최소한의 데이터만 선별적으로 오프로딩 함으로써, Greedy 기법에 근접한 최소 수준의 에너지 소비를 유지하였다. 결론적으로, 제안 기법은 큐 안정성을 보장하는 범위 내에서 불필요한 에너지 소모를

획기적으로 줄임으로써, SAGIN 환경에서 유일하게 실현 가능하고 효율적인 오프로딩 전략임을 입증한다.



<그림 2>: Task Data 에 따른 에너지 및 지연 시간 성능 비교

III. 결론

본 논문에서는 차세대 모빌리티(CAVs, UAM)의 안정적인 센싱 데이터 처리를 위해 SAGIN 환경에서의 리아프노프 최적화 기반 오프로딩 기법을 제안하였다. 제안 기법은 실시간 큐 상태에 따라 로컬 처리와 오프로딩을 동적으로 조절하여, 기존 기법들의 큐 폭증과 과도한 에너지 소모 문제를 동시에 해결하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 과부하 상황에서도 지연 시간 안정성을 완벽히 보장함과 동시에 불필요한 전송을 억제하여 에너지 효율성을 극대화함으로써, 고신뢰·고효율 엣지 컴퓨팅을 위한 최적의 솔루션임을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2022-NR070834)

참 고 문 헌

- [1] Cheng, N., Lyu, F., Quan, W., Zhou, C., He, H., Shi, W., & Shen, X. (2019). Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: A learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 37(5), 1117-1129.
- [2] Liu, J., Shi, Y., Fadlullah, Z. M., & Kato, N. (2018). Space-air-ground integrated network: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 2714-2741.
- [3] Ding, C., Wang, J. B., Zhang, H., Lin, M., & Li, G. Y. (2021). Joint optimization of transmission and computation resources for satellite and high altitude platform assisted edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(2), 1362-1377.
- [4] Mao, Y., Zhang, J., & Letaief, K. B. (2016). Dynamic computation offloading for mobile-edge computing with energy harvesting devices. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(12), 3590-3605.