

HAP 보조 LEO 위성 시스템에서의 사용자 할당 최적화 알고리즘 연구

김상민, 이인규
고려대학교 전기전자공학과
{smgeem, inkyu}@korea.ac.kr

User Allocation Method in HAP-aided LEO Satellite Networks

Sangmin Kim, and Inkyu Lee

School of Electrical Engineering, Korea University

요약

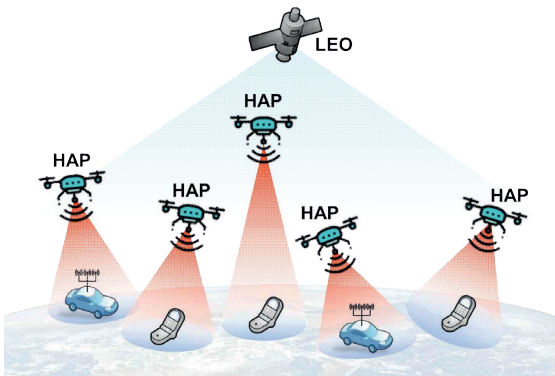
사물 간 연결성이 확대되면서 하나의 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)이 여러 고고도 플랫폼(High Altitude Platform, HAP)을 동시에 지원하는 서비스가 증가하고 있으며, 이에 따라 다중 HAP 네트워크에서 저전력 및 저지연 지표를 달성하는 것이 중요한 과제가 되었다. 본 논문은 각 사용자의 특성에 맞는 HAP를 효율적으로 할당하여 에너지 소비와 지연 시간을 최소화하는 알고리즘을 제안한다.

I. 서론

최근 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 네트워크는 넓은 커버리지와 낮은 지연속도를 제공함으로써 차세대 통신 기술 연구에서 핵심 역할을 차지하고 있다. 더 나아가서 최근 연구에서는 고고도 플랫폼 (High Altitude Platform, HAP)를 결합하여 배치 용이성과 운영 유연성이 향상된 시스템을 제안한다.[1] LEO 위성은 넓은 커버리지를 보장하기 위해 장기간 운용을 위한 내구성과 에너지 효율성을 중심으로 설계된 반면, HAP 위성은 사용자에게 더 근접한 위치에서 사용자와 통신함에 따라 더 향상된 계산 자원과 접근성, 유지 관리의 장점을 갖고 있다. 이러한 특성으로 인하여 LEO와 HAP 간 협력적 운용이 위성 네트워크에서 중요한 방향으로 부상하고 있다.

현대 기술에서 여러 사물 간 연결성이 확대됨에 따라 하나의 LEO가 다중 HAP를 서비스하는 서비스도 많아지고 있다.[2] 이에 따라 다중 HAP 네트워크에서 저전력 및 저지연 시스템을 어떻게 달성할지가 과제로 남게 되었다. 본 논문에서는 각 사용자의 상황에 적합한 HAP를 효율적으로 할당하여 에너지 소비 및 지연시간을 최소화하는 알고리즘을 제안한다.

II. 본론



<그림 1>: 다중 HAP 보조 LEO 위성 네트워크 시스템

본 논문에서는 하나의 LEO 위성이 K 개의 HAP 위성과 K 명의 사용자를 서비스하는 통신 시스템을 고려한다. 각 HAP 위성은 하나의 사용자의

센싱 정보만을 받으며, 서로 다른 HAP 위성은 다른 사용자의 센싱 정보를 받는 상황을 가정한다.

K 명의 사용자 중 k 번째 사용자의 센싱 정보의 양을 s_k 라고 지칭한다. 그리고 K 개의 위성 중 i 번째 HAP의 데이터 처리 밀도를 d_i , 하드웨어 효율성 상수를 δ_i , CPU 처리 속도를 f_i 라고 정의한다. 이때, i 번째 HAP가 k 번째 사용자의 센싱 정보를 처리하는데 필요한 처리 에너지 $E_{k,i}^s$ 는 <식 1>과 같다.

$$E_{k,i}^s = \delta_i d_i f_i^2 s_k \alpha_{k,i} \quad \text{<식 1>}$$

여기서 $\alpha_{k,i}$ 는 i 번째 HAP에서 k 번째 사용자의 센싱 정보 처리 유무를 나타내는 이진 변수이다. K 개의 HAP에서 처리한 센싱 정보는 LEO 위성으로 모두 전달된다. i 번째 HAP에서 k 번째 사용자의 센싱 정보를 전달하는데 필요한 전달 에너지 $E_{k,i}^t$ 는 <식 2>와 같다.

$$E_{k,i}^t = \frac{p_i s_k \alpha_{k,i}}{R_i} \quad \text{<식 2>}$$

여기서 i 번째 HAP에서의 송신 전력을 p_i , 전송 속도를 R_i 를 지칭한다. LEO에서는 K 개의 HAP로부터 전달받은 데이터를 일괄적으로 처리한다. 이때, LEO에서 정보를 처리할 때 필요한 에너지 E_0^s 는 <식 3>과 같다.

$$E_0^s = \delta_0 d_0 f_0^2 S \quad \text{<식 3>}$$

여기서 $S = \sum_{k=1}^K s_k$ 는 K 명의 사용자의 센싱 정보량의 총합을 의미한다.

한편, i 번째 HAP에서 k 번째 사용자의 센싱 정보를 처리할 때 및 LEO로 전달할 때의 지연시간을 $T_{k,i}^s$, $T_{k,i}^t$ 로 정의하며, 이는 각각 <식 4>와 <식 5>처럼 표현할 수 있다.

$$T_{k,i}^s = \frac{\delta_i d_i s_k}{f_i} \quad \text{<식 4>}$$

$$T_{k,i}^t = \frac{s_k \alpha_{k,i}}{R_i} \quad \text{<식 5>}$$

본 논문에서는 위성 시스템에서 총 소비 에너지 및 총 지연 시간을 최소화하는 문제를 최적화한다. 총 소비 에너지를 최소화하는 문제는 (P1), 지연시간을 최소화하는 문제는 (P2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (\mathcal{P}1) \underset{\{\alpha_{k,i}\}}{\text{minimize}} \quad & E_0^s + \sum_{k,i} (E_{k,i}^s + E_{k,i}^t) \\
 \text{subject to} \quad & \alpha_{k,i} \in \{0, 1\}, \forall k, i \\
 & \sum_{i=1}^K \alpha_{k,i} = 1, \forall k \\
 & \sum_{k=1}^K \alpha_{k,i} = 1, \forall i \\
 (\mathcal{P}2) \underset{\alpha_{k,i}}{\text{minimize}} \quad & \sum_{k,i} (T_{k,i}^s + T_{k,i}^t) \\
 \text{subject to} \quad & \alpha_{k,i} \in \{0, 1\}, \forall k, i \\
 & \sum_{i=1}^K \alpha_{k,i} = 1, \forall k \\
 & \sum_{k=1}^K \alpha_{k,i} = 1, \forall i
 \end{aligned}$$

본 논문에서 (P1)과 (P2)를 풀기 위해서 할당 알고리즘인 Hungarian 알고리즘[3]을 적용하였다. Hungarian 알고리즘은 K 명의 작업자에게 K 개의 작업을 할당할 때 총 비용을 최소화하는 최적의 일대일 매칭을 찾는 알고리즘으로, 현재 풀고자 하는 자원 최소화 문제에 완벽하게 적용할 수 있다. Hungarian 알고리즘은 비용 행렬의 각 행에서 행 최소값을 빼고, 각 열에서 열 최소값을 빼므로 각 행 및 열에 하나 이상의 0을 생성한다. 그 후, 가능한 많은 0을 선택하여 독립적인 매칭을 구성한다. 만약 매칭이 K 개가 생성되었다면 해당 매칭은 최적 해이며, 아니라면 행 및 열을 다시 조정하여 매칭이 K 개가 생성될 때까지 알고리즘을 반복한다.

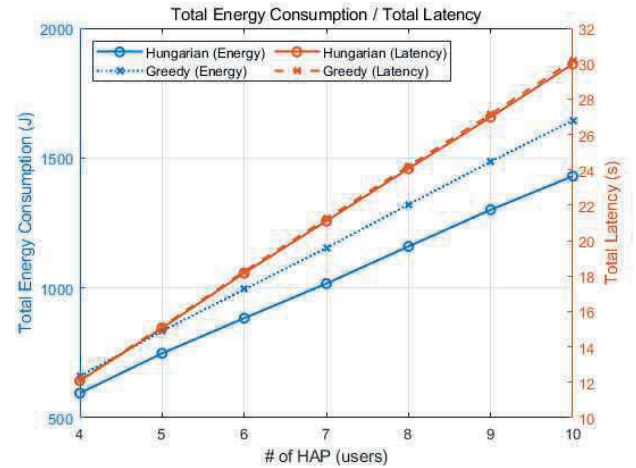
본 논문에서는 다음의 환경에서 실험을 진행하였다. LEO의 높이, CPU 속도 및 하드웨어 효율성 상수는 각각 100km, 5GHz, 10^{-26} 으로 설정하였다. K 개의 HAP는 [20,50]km 상공에 뜬 상황으로 가정하였으며, CPU 속도 및 하드웨어 효율성 상수는 10GHz, 10^{-30} 으로 고정하였다. 사용자 한 명의 센싱 데이터 크기 및 처리 밀도의 범위는 [50,200]KB와 [180,280]cycles/bit으로 설정하였다. 마지막으로 위성의 전력은 [10,100]W 내의 랜덤한 값으로 설정하였다.

비교 알고리즘으로는 탐욕(greedy) 알고리즘을 적용하였다. 탐욕 알고리즘은 1번 HAP부터 K 번 HAP까지 순서대로 주어진 사용자 중 가장 소비 에너지 또는 지연시간이 최소화되는 사용자를 선택하여 최적 해를 찾는 알고리즘이다.

<그림 2>는 각 알고리즘에 대하여 HAP의 개수에 따른 총 에너지 및 지연시간 변화 추이를 나타내는 그래프이다. 해당 그림을 통해 제안하는 Hungarian 알고리즘이 탐욕 알고리즘과 거의 유사한 지연시간을 보이면서 더 낮은 에너지 소모를 보임을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 HAP가 보조하는 LEO 위성 시스템에서 에너지 소비 및 지연시간을 최소화하기 위한 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 기법은 위성 통신의 중요 평가지표인 에너지 소비량과 지연시간에 모두 적용할 수 있으며, 탐욕 알고리즘 대비 더 낮은 에너지 소비량을 보여 우수성을 입증하였다. 본 논문에서는 하나의 HAP마다 하나의 사용자를 서비스하는 경우를 제안하였으며, 후속 연구로는 한 HAP가 여러 사용자를 서비스하는 시나리오로 확장할 계획이다.



<그림 2>: HAP의 개수에 따른 에너지 소비 및 지연시간 비교

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정보통신기획평가원 및 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2021-0-00260, RS-2022-NR070834)

참 고 문 헌

- [1] C. Ding et al., "Joint Optimization of Transmission and Computation Resources for Satellite and High Altitude Platform Assisted Edge Computing," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 2, pp. 1362-1377, Feb. 2022
- [2] G. Karabulut Kurt et al., "A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 729-779, Secondquarter 2021.
- [3] H. W. Kuhn, "The Hungarian Method for the Assignment Problem," in Naval Research Logistics Quarterly, vol. 2, no. 1-2, Mar. 1955.