

CubeSat 네트워크에서 핸드오버를 위한 강화학습 기반 Terrestrial-CubeSat 매칭 알고리즘

하태윤, 이충현, 전용인, Nguyen Thi My Tuyen, Demeke Shumeye Lakew, 조성래*

*중앙대학교

tyha@uclab.re.kr, chlee@uclab.re.kr, yijeon@uclab.re.kr, tuyen@uclab.re.kr,
demeke@uclab.re.kr ,*srcho@cau.ac.kr

Reinforcement Learning-Based Terrestrial-CubeSat Matching Algorithm for Handover in CubeSat Networks

Taeyun Ha, Chunghyun Lee, Yongin Jeon, Nguyen Thi My Tuyen,

Demeke Shumeye Lakew, Sungrae Cho*

*Chung-Ang Univ.

요약

본 논문은 CubeSat 네트워크에서 발생하는 핸드오버 등 다양한 네트워크 현상에서 사용되는 매칭 알고리즘에 대해 일반화를 진행하였으며, 강화학습 기반으로 이를 학습하여 최적의 매칭 결과를 도출하였다. CubeSat은 특성상 저궤도 위성에 속하며, 대략 초속 7.5km로 지구의 궤도를 돌고 있다. 이는 핸드오버 등 다양한 네트워크 현상에서 큰 문제점으로 야기될 수 있는 원인이기도 하다. 본 논문에서는 이러한 네트워크 현상의 해결책 중 하나로 매칭 시스템을 제안하며, 본 논문에서는 매칭시스템에 대하여 강화학습 기반으로 해결한다.

I. 서론

본 논문에서는 소형 위성인 CubeSat을 이용하여 지구의 어느 지역에서나 언제나 가능한 통신을 목표로 하는 네트워크 시스템에서 원활한 통신 연결을 위해 핸드오버 최적화 기법을 소개한다. CubeSat은 특성상 지구 저궤도 인공위성의 특징을 가지고 있으며, 보통 지구 표면으로부터 200 ~ 2000km인 고도의 궤도를 돌고 있는 위성이다. 이러한 위성은 고도에 따라 궤도 속도가 달라지는데, 고도 700km에 위치한 다목적실용위성은 초속 7.5km, 고도 1만 km에 위치한 중궤도 위성은 초속 4.9km, 고도 3만 6000km에 위치한 정지궤도 위성은 초속 3km로 비행한다. CubeSat은 다목적 실용위성에 속하기 때문에 대략 초속 7.5km로 비행한다.

이러한 빠르게 이동한다는 특징으로 인해 지상에서 저궤도 위성을 이용하여 통신할 경우 잦은 핸드오버가 발생하게 된다. 이는 핸드오버가 실패할 경우 링크의 연결이 끊어지게 되며, 통신의 안정성을 잃어버리게 된다. 또한, 핸드오버의 최적화부분에서든 다양한 부분에서 오버헤드가 많이 발생하게 되면, 네트워크 리소스의 예약에서 딜레이가 생기게 되며 이는 링크 전송 오류율의 증가로 이어지게 된다.

따라서, 본 논문의 목표는 빠르게 궤도를 회전하는 CubeSat과 위성에 비해 상대적으로 적지만 이동성을 가진 User Equipment(UE)에 관하여 강화학습을 기반으로 CubeSat과 UE들의 적절한 매칭을 하는 기법을 소개한다.

본 논문에서는 지구상의 위치한 UE들을 정확히 명시하기 위해서 Terrestrial이라는 명칭을 사용한다. 이러한 Terrestrial들은 SLNR과 SINR한 정의가 되어야 하며, 본 논문의 목표는 이러한 Ratio의 평균값들이 최대화를 시키는 것으로 한다.

Terrestrial의 Downlink의 채널 이득은 다음과 같다.

$$G_k^d(t, f) = \sum_{p=0}^{P_k-1} g_{k,p}^d \cdot \exp\{2\pi[tv_{k,p} - f\mu_{k,p}]\}$$

수식 1. Terrestrial의 Downlink 채널 이득

또한, Terrestrial의 Uplink 채널이득은 다음과 같다.

$$G_k^u(t, f) = \exp\{2\pi[tv_k^c - f\mu_k^{\min}]\} \cdot g_k^u(t, f)$$

수식 2. Terrestrial의 Downlink 채널 이득

해당 uplink와 downlink의 채널이득을 이용하여 Shannon Capacity를 통해 Channel capacity를 구할 수 있다.

$$w_e(t) = W \log_2 \left(1 + \frac{P_t G_t^d G_R^d (\lambda^2) (\frac{1}{d})^\gamma}{N_0 W + 1} \right)$$

수식 3. Terrestrial의 Channel Capacity

따라서, 본 논문의 목적함수는 CubeSat과 연결되어있는 Terrestrial의 channel capacity를 최대화하는 것으로 하며, 수식은 다음과 같다.

II. 본론

1. 시스템 모델

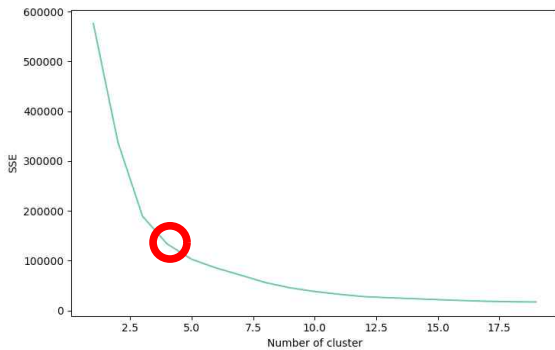
$$\text{maximize} \quad \sum_{t \in T_e} \sum_E w_e(t)$$

수식 4. 목적함수

2. 강화학습 기반 알고리즘

모든 Terrestrial에 관하여 강화학습을 진행하는 경우 시간복잡도가 기하급수적으로 증가하기 때문에, 너무나 큰 오버헤드를 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 K-means 알고리즘을 통해 지상의 Terrestrial을 군집화를 한 뒤, 해당 클러스터의 번호와 CubeSat을 매칭하기로 한다.

K-means에서 사용되는 Clustering의 개수는 클러스터 헤드와 각 노드들 간의 거리의 제곱합(SSE)을 계산하고 엘보우 기법을 사용하여 매 시간 Time slot마다 최적의 K를 찾고 클러스터링을 하게 된다. 본 논문에서는 10000개의 노드를 만들어 SSE를 계산을 진행해보았으며 결과 값은 다음과 같다.



빨간색 원을 엘보우 부분으로 확인하며 약 3개의 클러스터 헤드를 사용하여 클러스터링을 진행한다.

이렇게 클러스터링을 완료하면 매칭알고리즘은 강화학습을 사용하여 진행하게 된다. 강화학습에 사용되는 State, Action, Reward는 다음과 같다.

◆ STATE

State로는 클러스터의 총 개수, 클러스터 헤드의 좌표의 집합, Cubesat의 좌표의 집합, 이전 매칭 결과로 구성된다.

◆ ACTION

Action은 각 클러스터의 번호를 인덱스로 두고, 매칭되는 CubeSat의 집합으로 한다.

◆ REWARD

앞서 정의한 목적함수를 Reward로 하며, Reward를 최대화 하는 것을 목표로 한다.

해당 State, Action, Reward를 이용하여 매 TimeSlot마다의 최적화된 매칭을 진행을 한다.

III. 결론

본 논문에서는 빠르게 이동하는 CubeSat 네트워크 내에서 핸드오버 등 지상과의 통신에서 CubeSat과 매칭해야하는 문제들을 일반화하여 강화학습을 기반으로 풀이하였다. State나 Action space가 고차원 되어지는 문제를 방지하기 위하여 거리기반으로 K-means 알고리즘을 진행을 하고, 이 때 사용되는 K값은 SSE기반으로 엘보우 기법을 사용하여 찾아낸 후에, 강화학습을 사용하여 전체적인 토폴로지 및 환경을 학습하여 최적의 매칭 결과를 출력하도록 한다.

클러스터링 이후의 강화학습을 진행하기 때문에 해당 알고리즘의 복잡도 및 오버헤드 발생은 필수 불가결한 상황이다. 하지만, 클러스터링 매커니즘과 강화학습 매커니즘 둘 다 기계 학습을 진행하는 알고리즘으로 볼 수 있기에, 알고리즘의 병합을 통한 오버헤드 감소를 추후 연구에서 기대할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

[NRF-2019R1A2C1090447]

참 고 문 헌

- [1] P. I. Theoharis, R. Raad, F. Tubbal, M. U. Ali Khan and S. Liu, "Software-Defined Radios for CubeSat Applications: A Brief Review and Methodology," in IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, vol. 2, no. 1, pp. 10-16, March 2021, doi: 10.1109/JMASS.2020.3032071.
- [2] Y. Li, W. Zhou and S. Zhou, "Forecast Based Handover in an Extensible Multi-Layer LEO Mobile Satellite System," in IEEE Access, vol. 8, pp. 42768-42783, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977831.
- [3] Z. Wu, F. Jin, J. Luo, Y. Fu, J. Shan and G. Hu, "A Graph-Based Satellite Handover Framework for LEO Satellite Communication Networks," in IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 8, pp. 1547-1550, Aug. 2016, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2569099.
- [4] X. Fafoutis and V. A. Siris, "Handover Incentives for Self-Interested WLANs with Overlapping Coverage," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 11, no. 12, pp. 2033-2046, Dec. 2012, doi: 10.1109/TMC.2011.230.
- [5] O. N. Challa and J. McNair, "CubeSat Torrent: Torrent like distributed communications for CubeSat satellite clusters," MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/MILCOM.2012.6415828.