

다중 에이전트 Deep Q-network 기반 저궤도 위성 핸드오버 알고리즘

이충녕*, 김태훈**, 방인규**, 채승호*

한국공학대학교*, 한밭대학교**

lc9902130509@tukorea.ac.kr, {ikbang, thkim}@hanbat.ac.kr, shchae@tukorea.ac.kr

Multi-Agent Deep Q-network Based Low Earth Orbit Satellite Handover Algorithm

Chungneung Lee*, Taehoon Kim**, Inkyu Bang**, Seong Ho Chae*

Tech University of Korea*, Hanbat National University**

요약

본 논문에서는 핸드오버 횟수 최소화를 위한 다중 에이전트 Deep Q-network(DQN) 기반 저궤도 위성 핸드오버 알고리즘을 제안한다. 제안하는 핸드오버 알고리즘은 저궤도 위성 네트워크 통신 성능을 결정하는 중요한 요인인 남은 위성의 가시 시간, 서비스 위성 간의 부하 균형, 서비스 품질을 동시에 고려하여 탈중양화와 실시간성을 보장하도록 설계되었다. 시뮬레이션을 통해 제안된 핸드오버 알고리즘이 다른 기존 핸드오버 알고리즘 대비 핸드오버 발생 횟수가 69%에서 85%까지 감소시킬 수 있음을 보였다.

I. 서론

6세대 이동통신 시스템은 전 세계적인 커버리지와 끊임없는 통신 성능 제공할 것으로 예상되며, 이를 달성하기 위한 방안으로 최근 저궤도 위성 네트워크가 학계 및 산업계의 큰 관심을 받고 있다[1],[2]. 저궤도 위성 네트워크는 정지궤도 위성 네트워크에 비해 상대적으로 작은 전송 지연 시간과 에너지 소모를 가지는 장점이 있는 반면[3], 저궤도 위성의 매우 빠른 공전 속도는 빈번한 핸드오버를 발생시키는 문제를 야기시킨다. 이러한 빈번한 핸드오버 발생은 과도한 신호 오버헤드를 발생시킴으로써 사용자의 통신 성능 품질을 급격하게 감소시킨다[4]. 따라서, 저궤도 위성 네트워크의 핸드오버를 감소시키기 위한 핸드오버 알고리즘을 설계가 반드시 필요하다.

고궤도 저궤도 위성군과 빠른 공전 속도가 특징인 저궤도 위성 네트워크에서의 핸드오버 알고리즘 설계는 다양한 제약사항들을 고려한 설계가 필요하다. 핸드오버 발생시 핸드오버를 결정하는 핸드오버 결정자(사용자나 중앙 컨트롤러)는 남은 위성의 가시 시간, 서비스 위성 간 부하 균형, 그리고 서비스 품질을 고려하여 핸드오버를 결정해야 하며, 빠른 공전 속도 특성상 핸드오버 결정 과정이 실시간으로 신속히 이루어져야 한다. 본 논문에서는 동적으로 변하는 저궤도 위성 통신 네트워크에서 궤도 위성 네트워크에서 핸드오버 발생을 최소화하기 위한 다중 에이전트 Deep Q-network(DQN) 기반 실시간 저궤도 위성 핸드오버 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모델

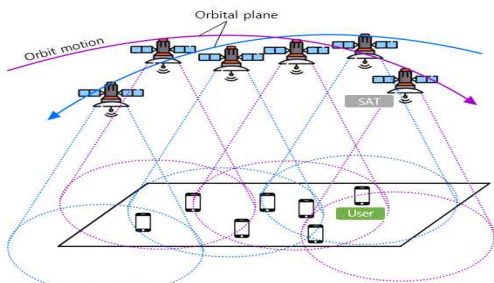


그림 1. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 보여준다. N개의 위성들이 K개의 서로 다른 공전 궤도를 따라 이동하면서 고정된 크기 영역의 사용자들을 서비스하는 시나리오를 고려한다. 동일 위성 셀 내의 사용자들 간에는 직교자원 할당을 통해 간섭이 발생하지 않으며, 다른 위성으로부터는 간섭을 받음을 가정한다. 사용자와 저궤도 위성 간의 채널은 자유 공간 경로 손실, 웨도우 라이시안 페이딩, 도플러 효과를 겪음을 가정한다. 저궤도 위성은 커버리지 내 사용자들에게 위성의 부하 정보를 주기적으로 전송하며, 사용자들은 이러한 부하 정보를 핸드오버 결정시 활용한다.

저궤도 위성 통신 환경의 신속한 변화에 효과적으로 대응하기 위해, 각 사용자들은 스스로 핸드오버를 결정한다. 이러한 방법은 핸드오버의 탈중양화를 가능하게 하며 응답 시간 최소화를 통해 실시간성 및 서비스 품질을 보장할 수 있다. 저궤도 위성의 공전 궤도는 사전에 정해져 있으므로, 지상에 있는 사용자는 현재 위성의 위치와 남은 위성의 가시 시간의 정보를 실시간으로 파악할 수 있음을 가정한다. 연속적인 시간을 이산적 시간으로 분할하고, 이산적 시간 단위마다 핸드오버 결정자는 어떤 위성으로 통신할지를 결정한다. 즉, 이전 시간 단계와 현재 시간 단계 간에 통신하는 위성이 다를 경우 핸드오버가 발생한 것으로 간주한다.

III. 제안하는 핸드오버 기법 및 성능 검증

본 장에서는 실시간 변하는 저궤도 위성 네트워크의 핸드오버를 최소화하기 위한 다중 에이전트 기반 DQN을 활용한 핸드오버 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다. 다중 에이전트 기반 DQN은 각각의 에이전트가 독립적으로 환경과 상호 작용하면서 동시에 서로에게 영향을 미치는 구조를 갖는데, 이는 에이전트 간의 경쟁 또는 협력을 일으킨다. 본 논문에서는 이러한 다중 에이전트 기반 DQN을 활용하여 저궤도 위성 네트워크를 위한 핸드오버 방안을 제안하였다. 이를 위해, 먼저 핸드오버 결정 문제를 다음과 같은 마르코프 결정 과정(Markov Decision Process, MDP)으로 정의하였다. 에이전트는 핸드오버 결정자인 사용자로 정의하고, 상태는 남은 위성의 가시 시간, 위성의 부하 정보, 채널 품질로 구성되며, 행동은 통신 위성 선택, 보상은 핸드오버나 서비스 품질을 보장하지

못하면 패널티를 받고, 그렇지 않으면 양의 보상을 받도록 구성하였다. 이러한 핸드오버 결정 문제에 대해 다중 에이전트 기반 DQN을 적용함으로써, 동적인 저궤도 위성 통신 환경에서 효과적으로 핸드오버가 가능하도록 설계하였다.

제안된 핸드오버 방법이 사용자 간 동적 상호 작용을 고려함으로써 향상된 성능 및 효율성을 가짐을 보이기 위해, 제안한 다중 에이전트 DQN (MADQN) 기반 저궤도 위성 핸드오버 알고리즘을 다른 알고리즘들과 성능을 비교 분석하였다. 비교 대상 알고리즘은 다음과 같다.

1. 랜덤기반핸드오버알고리즘(Random):

사용자는 다음 통신 위성을 선택할 때 커버리지 내부에 있는 위성 중 무작위하게 하나를 고른다.

2. 최대가시거리시간기반핸드오버알고리즘(MVT):

사용자는 다음 통신 위성을 선택할 때 가장 긴 가시거리 시간을 가진 위성을 선택한다.

본 시뮬레이션 환경에서는 10명의 사용자를 가정하며 이들 사용자는 무작위하게 지상 구역 내 분포되어 있다고 가정한다. 각 사용자는 $T=160$ 초, $t=1$ 초 간격으로 총 160 단계 동안 통신할 위성을 선택한다. 저궤도 위성의 파라미터는 스타링크의 저궤도 위성 파라미터를 따른다[5]. 각 DQN은 완전 연결 3계층으로 구성되어 있으며, 각 은닉층은 128 뉴런을 포함하고 있다, 활성화 함수로는 ReLU를 사용하며, 리플레이 메모리 크기는 1×10^6 이며, 학습률은 1×10^{-3} 이고, 배치 사이즈는 128이다. 타겟 DQN은 각각 1×10^3 단계마다 업데이트되며, 탐험율은 1에서 점차적으로 0.1로 감소하며, 옵티마이저로 Adam을 사용하였다.

그림 2는 MADQN 학습 과정에서 각 에피소드 마다 누적 보상을 보여준다. 이를 통해 누적 보상이 증가하는 경향을 확인할 수 있고, 이는 학습이 효과적으로 이루어졌음을 보여준다.

그림 3은 하나의 에피소드 동안 발생한 사용자 평균 누적 핸드오버 발생 횟수를 보여준다. Random 알고리즘은 거의 매 단계에서 핸드오버가 발생하는 것으로 나타나며, 그 다음으로 MVT, MADQN 순으로 핸드오버가 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안한 MADQN 기반 핸드오버 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 69%에서 85%까지 우수한 성능을 가짐을 보여준다.

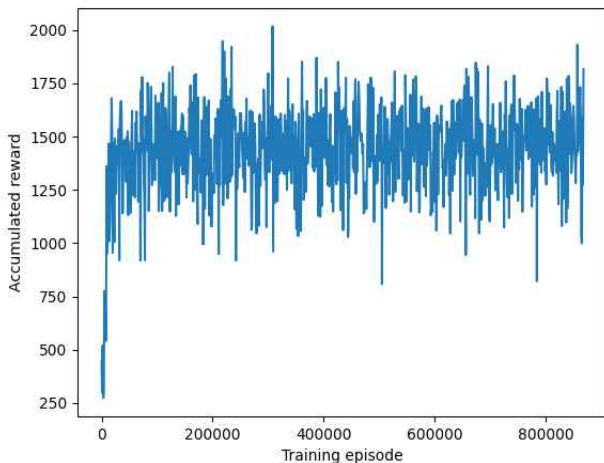


그림 2. 학습 과정의 누적 보상

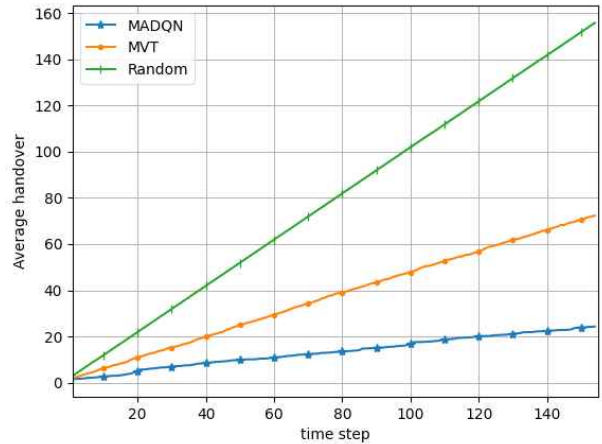


그림 3. 시간 단계에 따른 평균 누적 핸드오버 발생 횟수

IV. 결론

본 논문에서는 남은 위성의 가시 시간, 서비스 위성 간의 부하 균형, 그리고 서비스 품질을 고려하며, 탈중앙화, 실시간성을 보장하며 저궤도 위성 통신 간 핸드오버를 최소화하는 MADQN 기반 핸드오버 알고리즘을 제안했다. 시뮬레이션 결과를 통해 우리가 제안한 MADQN 기반 핸드오버 알고리즘이 다른 핸드오버 알고리즘보다 핸드오버 발생 횟수가 월등히 적음을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구이며 (21-106-A00-007, 우주계층 지능통신망 특화연구실), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1F1A1050633).

참 고 문 헌

[1] Y. Su, Y. Liu, Y. Zhou, J. Yuan, H. Cao, and J. Shi, "Broadband LEO satellite communications: Architectures and key technologies," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 2, pp. 55-61, Apr. 2019.

[2] S. H. Chae, H. Lim, H. Lee, and B. C. Jung, "Performance analysis of dense low earth orbit satellite communication networks with stochastic geometry," vol. 25, no. 2, pp. 208-221, Apr. 2023.

[3] G. Kim, S. Lee, H. Lim, B. C. Jung, and S. H. Chae, "Coverage probability analysis of LEO satellite communication systems with directional beamforming," in *Proc. of Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Paris, Jul. 2023, pp. 243-247.

[4] L. Yang, X. Yang, and Z. Bu, "A Group Handover Strategy for Massive User Terminals in LEO Satellite Networks," in *Proc. of IEEE 96th VTC.*, London, United Kingdom, Sep. 2022, pp. 1-6.

[5] Wikimedia Foundation. (2024, January 6). *Starlink*. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>