

빔호핑 LEO 위성 시스템에서 에너지 효율 최적화를 위한 D3QN 기반 스케줄링

김동현, 정해준, 이인호*

경희대학교, *한경국립대학교

{dhkim3988, haejoonjung}@khu.ac.kr, *ihlee@hknu.ac.kr

D3QN-Based Scheduling for Energy Efficiency Optimization in Beam-Hopping LEO Satellite Systems

Donghyeon Kim, Haejoon Jung, In-Ho Lee*

Kyung Hee Univ., *Hankyong Nat. Univ.

요약

본 논문에서는 빔호핑 (beam hopping, BH) 저궤도 (low Earth orbit, LEO) 위성 시스템에서 에너지 효율 극대화를 위한 dueling double deep Q-network (D3QN) 기반의 스케줄링 기법을 제안한다. 일반적으로, BH-LEO 위성 시스템에서, 타임 슬롯 스케줄링과 송신 전력 할당의 공동 최적화 문제는 혼합 정수 비선형으로 공식화되기 때문에 효율적으로 해결하기 어렵다. 해당 문제의 복잡성을 해결하기 위해 우리는 기존의 공동 최적화 문제를 동등하게 타임 슬롯 및 전력 할당 문제로 분리하는 방법을 소개한다. 그 후, 타임 슬롯 스케줄링 문제를 풀기 위한 D3QN 기반의 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 에너지 효율 및 정전 확률 모두에서 높은 성능을 가져갈 수 있음을 입증한다.

I. 서론

최근, 넓은 지역의 사용자들에게 효율적으로 서비스를 제공하기 위해 저궤도 (low Earth orbit, LEO) 위성 기반 통신이 활발하게 논의되고 있다. 특히, 빔호핑 (beam hopping, BH) 기술은 LEO 위성 시스템의 복잡성과 비용 측면에서 효율적으로 절충안을 제시할 수 있는 기술로 다양하게 연구가 진행되고 있다 [1]. 본 연구에서는, 이를 위해 BH-LEO 위성 시스템에서 에너지 효율 (energy efficiency, EE) 최적화 문제를 해결하기 위한 스케줄링 기법을 제안한다. 하지만, 일반적으로 BH-LEO 위성 시스템에서는 타임 슬롯 스케줄링과 송신 전력을 동시에 할당하는 mixed integer nonlinear programming (MINLP) 문제를 고려하기 때문에 전역 최적점을 찾기가 어렵다. 우리는 공동 최적화 문제를 독립된 타임 스케줄링 및 송신 전력 최적화 문제로 분리하고, 최적 조건을 분석하여 타임 스케줄링 문제를 단순화 시킨다. 그 후, 분리된 문제를 풀기 위해 우리는 dueling double deep Q-network (D3QN) 기반의 심층 강화학습 기법을 제안한다. 기존에는 타임 스케줄링에서 quadratic transform [2] 기법 및 monotonic optimization [3] 기법들이 제안되었으나, 높은 반복적 수렴 과정이 요구된다. 제안된 기법은 학습을 통한 자원 할당 방식으로 해당 복잡도 문제를 해결할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안된 D3QN 기법이 기존의 반복적 알고리즘 대비 복잡성을 크게 줄이면서 EE 및 정전 성능들을 크게 향상할 수 있음을 보인다.

II. 시스템 모델 및 제안된 D3QN 기반 타임 스케줄링 기법

본 논문에서 우리는 단일 LEO 위성 기반의 빔 호핑 위성 통신 시스템을 고려한다. LEO 위성은 고정된 M_{fix} 개의 빔을 형성하며, 동시에 M_{act} 개의 활성화된 빔들로 구성된다. 여기서, BH 그룹을 BH를 수행하는 M_{act} 개의 활성화된 빔의 집합이라고 정의할 때, 그룹의 수를 G 라고 표기하고, 각 빔에는 K 명의 사용자가 있다고 가정한다.

우리는 BH 윈도우가 고정된 시간 길이를 가지며, 하나의 BH 주기가 모든 그룹에게 순차적으로 서비스를 제공한 후 BH 윈도우가 종료된다고 가정한다. BH 윈도우 내의 최대 타임 슬롯 수를 T_{max} 라 하며 각 그룹에 할당된 타임 슬롯 수를 T_g 라 할 때, 다음 조건을 만족한다 $\sum_{g \in G} T_g \leq T_{max}$.

모든 빔은 BH 윈도우 동안 고정된 3dB 빔 폭 각도를 유지하며, 모든 채널 이득은 quasi static이라고 가정한다. 또한, 각 빔 내의 K 명의 사용자들은 서로 직교하는 개의 K 채널에 할당되며, 시스템 대역폭 B 는 균등하게 나눠진다. 지상 사용자 k 는 다음과 같은 주파수 효율을 갖는다 [3].

$$\Gamma_{g,m,k} = \log_2 \left(1 + \frac{\tilde{h}_{g,m,k} p_{g,m,k}}{\sum_{i \in \mathbb{M}_g \setminus \{m\}} \tilde{h}_{g,i,k} p_{g,i,k} + 1} \right), \quad (1)$$

여기서 $\tilde{h}_{g,m,k} = h_{g,m,k} / (\sigma_N B / K)$ 는 사용자 k 의 채널 대 잡음 비의 미한다.

본 논문에서는 지상 사용자들의 트래픽 요구 사항을 만족시키면서 지상 사용자들의 EE를 최대화하는 문제를 고려하며, 다음과 같이 정의된다.

$$\max \frac{B}{K} \frac{\sum_{g \in G} \frac{T_g}{T_{max}} \sum_{m \in \mathbb{M}_g} \sum_{k \in \mathbb{K}_{g,m}} \Gamma_{g,m,k}}{\sum_{g \in G} \frac{T_g}{T_{max}} \sum_{m \in \mathbb{M}_g} \sum_{k \in \mathbb{K}_{g,m}} p_{g,m,k} + P_C}, \quad (2a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{g \in G} T_g \leq T_{max}, \quad (2b)$$

$$\sum_{g \in G} \frac{T_g}{T_{max}} \sum_{m \in \mathbb{M}_g} \sum_{k \in \mathbb{K}_{g,m}} p_{g,m,k} \leq P_{max}, \quad (2c)$$

$$\frac{B}{K} \frac{T_g}{T_{max}} \Gamma_{g,m,k} \geq D_{g,m,k}, \quad (2d)$$

여기서 (2a)의 P_C 는 LEO 위성의 회로에서 소모된 전력의 총합이다. (2b)

그

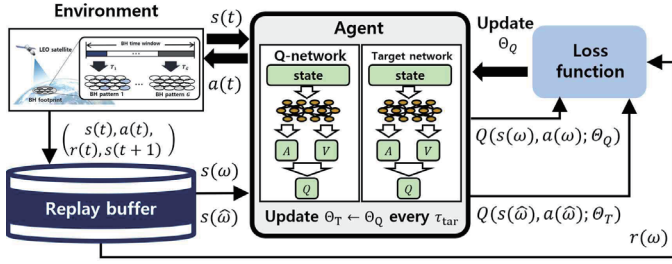


그림 1. 제안된 D3QN 기반 타임 슬롯 할당 알고리즘

리고 (2c)는 각각 최대 타임 슬롯 수 T_{\max} 및 최대 전력 할당 P_{\max} 에 대한 제약이다. 또한, (2d)는 사용자에게 요청된 트래픽 요구사항 $D_{g,m,k}$ 에 관련된 제약 조건이다. MINLP 문제인 (2)는 복잡성이 크기 때문에 타임 스케줄링 문제만 분리하고 [3]에서 제시된 것과 같이 단순화시킨다.

$$\min \sum_{g \in \mathcal{G}} \frac{T_g}{T_{\max}} \sum_{m \in \mathcal{M}_g} \sum_{k \in \mathcal{K}_{g,m}} P_{g,m,k}^{\min} \quad (3a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{g \in \mathcal{G}} T_g = T_{\max}, \quad (3a)$$

(3)의 단순화된 문제를 통해서 우리는 효율적으로 타임 스케줄링을 최적화 가능하다. 본 연구에서는 고려된 문제를 해결하기 위해 그림 1과 같은 D3QN 기반 타임 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안된 D3QN 프레임워크는 (3) 문제를 효율적으로 풀 수 있도록 Markov decision process (MDP)를 설계하며, D3QN의 심층 신경망 구조가 action을 수행할 때 reward를 최대화할 수 있도록 하는 손실 함수를 설정한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

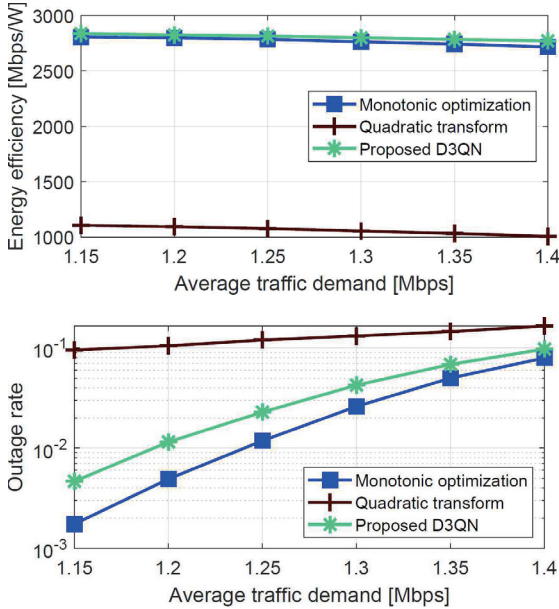


그림 2. 트래픽 요구의 변화에 따른 EE 및 정전확률 변화

본 장에서는 평균 트래픽 요구 사항의 변화에 따른 제안된 D3QN 기법의 EE 및 outage rate 성능을 평가한다. 여기서, $M_{fix} = 16$, $M_{act} = 4$, $K = 3$, $\theta_{3dB} = 3^\circ$, $B = 10\text{MHz}$, $T_{\max} = 32$, $P_{\max} = 53\text{dBm}$, 그리고 을 가정한다. 또한, 제안된 D3QN (proposed D3QN) 기법과 비교하기 위해 [2]의 quadratic transform 기법 및 [3]의 monotonic optimization 기법들이 고려된다. 특히, [2]의 기법의 성능의 한계를 해결

하기 위해 [3]의 기법이 제안되어 최적에 가까운 성능을 얻을 수 있으나, 반복적 알고리즘의 한계로 계산 복잡도가 높다는 단점이 있다. 또한, 각 기법들의 성능을 공정하게 분석하기 위해 [4] 연구에서 제시된 최적의 trust-region-based interior point method (TR-IPM) 기반의 송신 전력 할당 기법을 통해 각 사용자의 송신 전력을 할당한다.

그림 2는 평균 트래픽 요구의 변화에 따른 EE 및 정전 확률의 성능을 제시한다. 그림에서 볼 수 있듯이 proposed D3QN 기법이 모든 트래픽 요구 사항의 영역에서 quadratic transform 기법의 EE 및 정전 확률 성능들에 비해 더 높은 성능을 달성할 수 있음을 보인다. 또한, 최적에 근접한 성능을 달성할 수 있는 monotonic optimization 기법 대비 proposed D3QN 기법은 비교적 더 낮은 정전 확률 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만, DNN의 학습 기반의 자원 할당 방식에 의해 proposed D3QN 기법은 monotonic optimization 기법 대비 0.0047% 그리고 quadratic transform 기법 대비 0.0076%의 알고리즘 수행 시간을 소모한다. 이러한 결과는 제안된 DNN 프레임워크의 효과성을 더욱 입증하며, 이는 경쟁력 있는 EE 및 정전 성능을 유지할 뿐만 아니라 계산 오버헤드를 획기적으로 줄여, BH-LEO 위성 통신 시스템에 실질적으로 적용하기에 적합함을 보여준다.

본 논문에서는 BH-LEO 위성 통신 시스템의 EE를 극대화하면서 동시에 지상 사용자들의 트래픽 수요를 만족시키기 위한 D3QN 기반의 타임 스케줄링 프레임워크를 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 기존의 반복적 접근법에 비해 EE와 아웃티지 성능을 모두 크게 향상시켰음을 보였다. 따라서 제안된 접근법은 대규모 BH-LEO 위성 통신 시스템에서 효율적인 자원 관리를 위한 실용적이고 확장 가능한 솔루션을 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grant (RS-2022-NR069055) and in part under the ITRC support programs (IITP-2025-RS-2021-II212046).

참고 문헌

- [1] I.-H. Lee, "Time allocation scheme for user fairness enhancement non-terrestrial networks using beam hopping," *J. Korea Institute Inf. Commun. Eng.*, vol. 28, no. 6, pp. 720–727, Jun. 2024.
- [2] L. Lei, A. Wang, E. Lagunas, X. Hu, Z. Zhang, Z. Wei, and S. Chatzinotas, "Spatial-temporal resource optimization for uneven-traffic LEO satellite systems: Beam pattern selection and user scheduling," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 42, no. 5, pp. 1279–1291, May 2024.
- [3] D. Kim, H. Jung, I.-H. Lee, and D. Niyato, "Multi-beam management and resource allocation for LEO satellite-assisted IoT networks," *IEEE Internet Things J.*, early access, Feb. 2025.
- [4] R. H. Byrd, M. E. Hribar, and J. Nocedal, "An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming," *SIAM J. Optim.*, vol. 9, no. 4, pp. 877–900, Sep. 1999.