

무선 은닉 통신 환경에서 강건성과 은닉성 최대화를 위한 계층적 강화학습 기반 무인기 전송 전력 및 위치 제어 기법

김태욱, 이호원
아주대학교

ktw98@ajou.ac.kr, howon@ajou.ac.kr

Hierarchical Reinforcement Learning-Based UAV Transmission power Control and Position Control for Maximizing Robustness and Covertness in Wireless Covert Communications

Taewook Kim, Howon Lee

Ajou univ.

요약

본 논문은 무선 은닉 통신 환경에서 unmanned aerial vehicle(UAV)를 활용하여 네트워크의 강건성과 은닉성을 최대화할 수 있는 계층적 강화학습 기반 무인기 전송 전력 및 위치 제어 기법을 제안한다. 제안 방안은 도청자가 존재하는 네트워크 환경에서 네트워크 내 송신자인 UAV가 은닉 정보를 수신하는 지상 사용자의 유효 처리량을 최대화하고, 도청자의 최소 감지 오류 확률을 최대화하는 것을 목적으로 한다. 시뮬레이션을 통해 제안 방안과 여러 비교 방안과의 비교를 통해 제안 방안이 강건성과 은닉성 측면에서 뛰어난 성능을 보임을 확인하였다.

I. 서론

Unmanned aerial vehicle(UAV)는 3차원 이동성, LoS 채널 이득 등 다양한 이점으로 인해 여러 가지 분야에서 연구되고 있다 [1]. 특히, 무선 은닉 통신 환경에서 UAV가 갖는 3차원 이동성은 네트워크에 존재하는 도청자, 지상 사용자와 UAV의 사이 거리를 동적으로 조절하여, 신호를 효과적으로 은닉할 수 있는 장점이 있다. 하지만, UAV의 제한된 배터리 문제로 인하여 강력한 암호화나 보안 프로토콜을 탑재하기 어렵고, air-to-ground(A2G) 무선 채널의 개방성은 정보를 은닉하기 어려운 단점이 존재한다 [2]. 이와 같은 한계를 극복하고자 UAV를 활용한 무선 은닉 통신 환경에서 다양한 연구들이 진행되었다 [3-5]. 하지만, 기존 연구들은 대부분 네트워크 내의 한 개의 도청자가 존재하는 환경이나 2차원 환경만을 고려한 제약적인 환경에서 연구되었다. 따라서, 본 논문에서는 3차원 무선 은닉 통신 환경에서 계층적 강화학습 기반 무인기 전송 전력 및 위치 제어를 통해 네트워크의 유효 처리량과 최소 감지 오류 확률을 최대화할 수 있는 계층적 강화학습 기법을 제안한다.

II. 계층적 강화학습 기반 강건성과 은닉성 최대화 기법

본 논문에서는 UAV 송신자인 Alice($A_i, i \in \{1, 2, \dots, I\}$)가 자신의 그룹 내 지상 사용자인 Bob($B_j, j \in \{1, 2, \dots, J\}$)에게 은닉 정보를 송신하고, 동시에 은닉 정보를 감지하려고 시도하는 도청자인 Willie($W_k, k \in \{1, 2, \dots, K\}$)에게 자신의 신호를 은닉하는 무선 은닉 환경을 고려한다. 이러한 환경에서 계층적 강화학습을 통해 UAV의 전송 전력 및 위치를 제어하여 Bob의 유효 처리량과 Willie의 최소 감지 오류 확률을 최대화하는 것을 목표로 한다. Bob의 유효 처리량은 $T_{eff} = N_c R(1 - \delta)$ 와 같이 정의되고 N_c, R, δ 은 각각 채널의 개수, 전송률, 디코딩 에러 확률을 나타낸다. 또한, Willie의 수신 신호는 오직 잡음만 수신하는 경우 H_0 , 어떠한 신호가 들어오는 경우 H_1 이 존재한다. Willie는 자신의 평균 수신 전력 E_k 와 감지 임계값 Γ^* 을 통해 Alice가 신호를 전송하였는지, 하지 않았는지 결정을 내리게 된다. 각 결정은 D_1, D_0 로 나타내며, Willie의 감지 오류 확률 ξ 은 $\xi = \xi_1 + \xi_2$ 로 나타내고, ξ_1, ξ_2 는 각각 $P\{D_1|H_0\}, P\{D_0|H_1\}$ 으로 나타낸다 [6]. 본 논문에서는 계층적 강화학습을 이용하여 에이전트의 행동 공간을 내부 루프 행동, 외부 루프 행동으로 나누어서 학습을 진행한다. 내부 루프 행동은 전송 전력을 제어하고, 외부 루프 행동은 위치를 제어한다. 또한, 제안하는 계층적 강화학습의 보상은 $R = \omega \cdot T_{eff}^* + (1 - \omega) \cdot \xi^*$ 으로 계산된다. 여기서, ω 는 가중치를 나타내고, T_{eff}^* 는 Alice가 은닉 신호를 송신한 Bob의 유효 처리량 평균, ξ^* 는 최소 감지 확률을 나타낸다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

본 논문에서는 다중 Alice, 다중 Willie가 존재하는 네트워크 환경을 고려한다. 각 Alice와 Bob의 초기 위치는 네트워크 내에 무작위로 배치되고, Willie의 초기 위치는 각각 $[0, 40], [0, -40]$ 에 위치한다. 그림 1의 (a)는 1 Alice, 1 Bob, 1 Willie가 존재하는 환경에서 시뮬레이션 결과이고, 에피소드에 따른 제안 방안과 optimal의 평균 보상의 비교를 통해 제안 방안이 간단한 환경에서 최적에 수렴함을 확인하였다. 또한, 그림 1의 (b), (c), (d)는 3 Alice, 6 Bob, 2 Willie가 존재하는 환경에서 각각 에피소드에 따른 평균 보상, 평균 유효 처리량, 평균 최소 감지 에러 확률을 확인할 수 있다. 다양한 비교 방안과 제안 방안의 비교를 통해 제안 방안이 비교

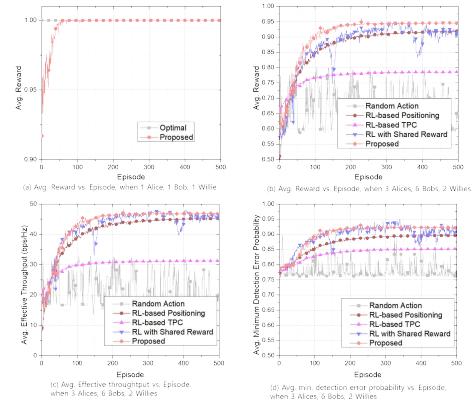


그림 3. 시뮬레이션 결과, (a) 에피소드 별 평균 보상, (b) 에피소드에 따른 평균 보상, (c) 에피소드에 따른 평균 유효 처리량, (d) 에피소드에 따른 평균 최소 감지 에러 확률

방안에 비해 더 높은 수렴 값을 갖고, 안정적으로 학습을 진행했음을 확인하였다. 본 논문은 무선 은닉 통신 환경에서 강건성과 은닉성을 최대화할 수 있는 계층적 강화학습 기법을 제안하였고, 비교 방안과의 충분한 비교를 통해 제안 방안의 성능을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 한국연구재단의 지원(RS-2025-00563401, 3차원 공간에서 에너지 효율적 멀티레벨 AI-RAN 구현을 위한 AI-for/and-RAN 핵심 원천 기술 연구), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발), 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] H. Lee, et al., "Towards 6G hyper-connectivity: Vision, challenges, and key enabling technologies," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, June 2023.
- [2] X. Sun, D. et al., "Physical Layer Security in UAV Systems: Challenges and Opportunities," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 5, pp. 40-47, October 2019.
- [3] H. Mao, et al., "Joint resource allocation and 3d deployment for multi-uav cover communications," *IEEE Internet of Things Journal*, 2023.
- [4] J. Hu, M., et al., "Deep reinforcement learning enabled covert transmission with uav," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 917-921, 2023.
- [5] X. Zhou, et al., "Three-dimensional placement and transmit power design for uav covert communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 12, pp. 13 424 - 13 429, 2021.
- [6] S. Yan, et al., "Delayintolerant covert communications with either fixed or random transmit power," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 1, pp. 129-140, 2018.