

3차원 무선 은닉 통신 환경에서 강건성과 은닉성 최대화를 위한 다중 에이전트 강화학습 기법

김태욱¹, 성하영², 이호원¹
아주대학교¹, 한국과학기술정보연구원²

{ktw98, howon}@ajou.ac.kr¹, shy2028@kisti.re.kr²

Multi-Agent Reinforcement Learning Techniques for Maximizing Robustness and Covertness in 3D Wireless Covert Communications

Taewook Kim¹, Hayoung Seong², Howon Lee¹
Ajou University¹, Korea Institute of Science and Technology Information²

요약

본 논문은 UAV(unmanned aerial vehicle)를 활용한 무선 은닉 통신 환경에서 UAV의 3차원 이동 및 전송 전력 제어를 통해 유효 처리량과 최소 검출 에러 확률을 최대화하기 위한 강화학습 기법을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 성능을 검증하였다.

I. 서론

무선 은닉 통신에서는 물리 계층의 특성을 이용하여 정보를 보호하기 때문에 암호화를 통해 정보를 보호하는 기법에 비해 계산 복잡도와 운용 효율성의 이점이 있다 [1-3]. 특히, UAV(unmanned aerial vehicle)를 이용한 무선 은닉 통신은 LoS(line of sight) 채널 이득과 유연한 배치 등의 많은 장점이 있기 때문에, 무선 은닉 통신에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [4-6].

본 논문에서는 3차원 무선 은닉 통신 환경에서 처리량과 최소 검출 에러 확률을 최대화 하기 위해 강화학습을 이용한 UAV의 최적 전송 전력 제어 및 위치 결정 기법을 제안한다.

II. 다중에이전트 강화학습 기반 은닉성과 강건성 최대화 기법

지상 유저 B_i (Bob), $i \in \{1, \dots, J\}$, n 개의 채널을 이용하여 은닉 데이터를 송신하는 UAV A_j (Alice), $j \in \{1, \dots, J\}$, 데이터 송신을 감지하는 유저 W_k (Willie), $k \in \{1, \dots, K\}$ 가 존재하는 상황에서 W_k 에게 정보를 은닉하고, 지상 유저인 B_i 의 처리량을 최대화하며 검출 에러 확률을 최소화 하는 것을 목표로 한다.

A_j 가 B_i 에게 은닉 신호를 보낼 때, B_i 의 수신 신호는 식 (1)과 같다. P_i 는 A_i 의 송신 전력을 나타내고, h_{ij} 는 채널, n_i 는 B_i 의 AWGN(additive white Gaussian noise) 나타낸다. 유효 처리량 T_{eff} 는 $T_{eff} = NR(1 - \delta)$ 로 정의되고, N 은 채널의 개수, R 은 스펙트럼 효율성, δ 는 디코딩 에러율이다.

$$y_i[n] = \sqrt{P_j} h_{ij} x_n + n_i[n]. \quad (1)$$

무선 은닉 통신 환경에서 W_k 는 A_j 의 데이터 전송 여부를 항상 감지하려고 시도한다. W_k 는 식 (2)와 같이 두 가지 가설로 동작한다.

$$y_k[n] = \begin{cases} n_k[n], & H_0, \\ \sqrt{P_i} h_{ik} x[n] + n_{k[n]}, & H_1. \end{cases} \quad (2)$$

H_0 , H_1 은 각각 A_j 가 송신하지 않았을 경우, 송신한 경우이다. 두 가지 가설을 기반으로 W_k 는 결정 D_0, D_1 을 내리게 된다. D_0, D_1 은 각각 A_j 가 전송을 하지 않았다고 결정하는 경우, A_j 가 전송을 했다고 결정하는 경우이다.

W_k 가 신호를 잘못 검출하는 경우는 false alarm, miss detection 두 가지로 나뉘게 된다. 이는 각각 $\alpha = \Pr\{D_1|H_0\}$, $\beta = \Pr\{D_0|H_1\}$ 이고, W_k 의 검출 에러 확률 ξ 는 $\xi = \alpha + \beta$ 로 정의된다.

강화학습의 에이전트인 A_j 는 자신의 위치 및 전송 전력을 상태로 가지게 되고, A_j 는 매 타임스텝마다 자신의 3차원 위치 제어($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)와 전송 전력 제어(ΔP)를 결정한다. 보상 r 을 $T_{eff} \times \min(\xi_k^*)$ 로 설계하여 강화학습의 에이전트인 A_j 가 최소 검출 에러 확률 ξ_k^* 와 유효 처리량 T_{eff} 을 최대화하는 것을 목표로 학습을 진행하게 한다.

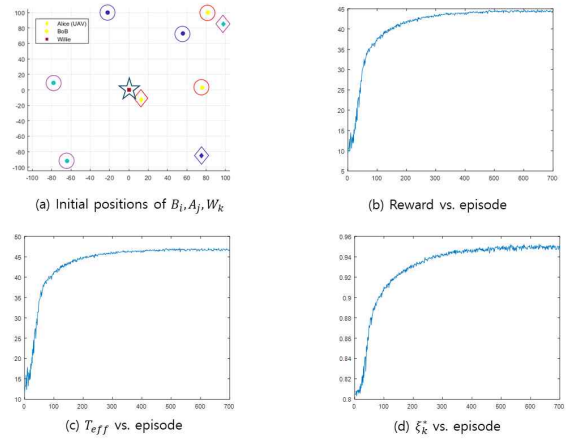


그림 1. (a) B_i , A_j , W_k 의 초기 위치. (b) 에피소드에 따른 보상. (c) 에피소드에 따른 T_{eff} . (d) 에피소드에 따른 ξ^*

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

200×200m 크기의 네트워크에서 B_i 와 A_j 는 각각 랜덤하게 위치해 있고, W_k 는 네트워크의 중앙에 위치한다. $P_j = [3, 10]$ [dBm], 고도 $H_j = [150, 300]$ [m], $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $j = \{1, 2, 3\}$, $k = 1$, $N = 100$ 인 환경에서 수행되었으며, 시뮬레이션을 통해 제안 방안이 T_{eff} , ξ_k^* 를 최대화하는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21 4단계 프로그램 지원(NRF5199991514504, 50%)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2022R1A2C1010602, 50%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] S. Yan, B. He, X. Zhou, Y. Cong and A. L. Swindlehurst, "Delay-Intolerant Covert Communications With Either Fixed or Random Transmit Power," in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 14, no. 1, pp. 129-140, Jan. 2019.
- [2] X. Jiang, Z. Yang, N. Zhao, Y. Chen, Z. Ding and X. Wang, "Resource Allocation and Trajectory Optimization for UAV-Enabled Multi-User Covert Communications," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 2, pp. 1989-1994, Feb. 2021.
- [3] 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.
- [4] Eunjin Kim, et al., "HiMAQ: Hierarchical Multi-agent Q-Learning-Based Throughput and Fairness Improvement for UAV-aided IoT Networks," Elsevier Journal of Network and Computer Applications, vol. 223, Mar. 2024.
- [5] Suhyeon Lim, et al., "Optimal Tethered-UAV Deployment in A2G Communication Networks: Multi-Agent Q-Learning Approach," IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 19, pp. 18539-18549, Oct. 2022.
- [6] Seungmin Lee, et al., "Multi-Agent Q-Learning Based Multi-UAV Wireless Networks for Maximizing Energy Efficiency: Deployment and Power Control Strategy Design," IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 9, pp. 6434-6442, May 2022.