

계층적 심층 강화학습 기반 공중-지상 협력 재밍 기법

전가겸, 전영일*, 서정현*, 정방철**, 이호원
아주대학교, *LIG Nex1, **충남대학교

kuem0803@ajou.ac.kr, *{youngil.jeon, junghyun.seo}@lignex1.com, **bcjung@cnu.ac.kr, howon@ajou.ac.kr

Hierarchical Deep Reinforcement Learning-based Air-Ground Cooperative Jamming Algorithm

Kakyeom Jeon, Youngil Jeon*, Junghyun Seo*, Bang Chul Jung** and Howon Lee
Ajou Univ., *LIG Nex1, **Chungnam Univ.

요약

본 논문은 3차원 전장 환경에서 unmanned aerial vehicle (UAV) 재머 (UAV jammer, UJ)와 지상 재머(ground jammer, GJ)가 협력 재밍을 수행함으로써 빠른 속도로 이동하는 malicious UAV (MU)를 재밍을 통해 무력화하는 것을 목표로 한다. 이에 따라, GJ와 UJ가 각각 빔 폭 제어와 전력 및 이동 제어를 수행하도록 하는 계층적 구조의 심층 강화학습 기반 공중-지상 협력 재밍 기법을 제안한다.

I. 서론

3차원 이동성을 갖춘 unmanned aerial vehicle (UAV)는 지상 인프라에 의존하지 않으며, 전장 환경에서 정찰 및 타격과 같은 매우 중요한 임무를 담당하고 있다 [1-3]. UAV의 임무 수행을 방해하기 위한 electronic warfare에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 재밍이 electronic counter measure를 위한 핵심 기술들 중 하나로 고려되고 있다 [4]. 위치가 고정된 지상 재머(ground jammer, GJ)는 재밍 범위가 한정적이며, UAV 재머(UJ)는 한정된 배터리 용량과 상대적으로 작은 재밍 전력으로 인한 짧은 재밍 거리 등의 문제점들을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 계층적 심층 강화학습 기반 협력 재밍 기법을 제안한다. 제안 방안은 GJ의 빔 폭을 동적으로 조정하고, UJ의 이동 및 재밍 전력 제어를 통해 malicious UAV (MU)에 대해 효과적인 재밍을 수행하는 것을 목표로 한다.

II. 계층적 심층 강화학습 기반 공중-지상 협력 재밍 기법

본 논문에서는 적 지상 기지국으로부터 MU가 수신하는 명령 신호를 재밍 하기 위해 계층적 심층 강화학습 기반 협력 재밍 기법에 관한 연구를 진행한다. GJ와 UJ는 각각 ground-to-air, air-to-air 재밍을 수행한다. Two-step 빔 패턴 기반의 재밍을 수행하는 GJ는 재밍이 강력한 main-lobe 범위에 MU가 포함되도록 빔 폭을 최적화한다 [2]. UJ는 이동 제어를 통해 MU를 지속적으로 추적하며, 한정된 배터리 문제를 고려하여 전력 대비 재밍 영향력을 극대화하도록 재밍 전력을 최적화한다. 특히, UJ는 계층적 구조의 프레임워크로 이동 및 전력 제어를 분리하여 전반적인 계산 복잡도를 낮춘다. 제안 방안은 GJ와 UJ를 각각 에이전트로 취급하여 다음과 같은 심층 강화학습의 서로 다른 MDP 구조를 정의한다.

- State: MU의 위치와 이를 고려한 각 재머의 행동 요소를 상태로 정의한다. GJ는 빔 폭 θ_g 와 MU의 좌표를 포함한 상태를 정의한다; $s_g = (\theta_g, x_m, y_m, z_m)$. UJ는 재밍 전력 P_u 와 MU 및 UJ의 좌표를 포함한 상태를 정의한다; $s_u = (P_u, x_u, y_u, z_u, x_m, y_m, z_m)$.
- Action: GJ는 θ_g^{\min} 와 θ_g^{\max} 사이에서 빔 폭을 $\Delta\theta_g$ 만큼 증가, 감소 혹은 유지의 빔 폭 제어를 수행한다; $a_g \in \{\pm\Delta\theta_g, 0\}$. 반면, 계층적 구조를 가지는 UJ의 inner-loop는 UAV가 위치할 수 있는 3차원 공간 내에서 x, y, z 중 하나의 방향으로 v_u 만큼 UJ를 이동하거나 현재 위치를 유지하고, outer-loop는 P_u^{\min} 와 P_u^{\max} 사이에서 재밍 전력을 ΔP_u 만큼 증가, 감소 혹은 유지의 전력 제어를 수행한다; $a_u^{\text{in}} \in \{\pm\Delta x_u, \pm\Delta y_u, \pm\Delta z_u, 0\}$, $a_u^{\text{out}} \in \{\pm P_u, 0\}$.
- Reward: 최소화를 목적으로 하는 MU의 데이터 탈취를 기반으로 GJ와 UJ가 서로 다른 보상을 정의한다.

$$r_g = -BW \times \log(1 + \Gamma_m), \quad (1)$$

$$r_u = -BW \times \log(1 + \Gamma_m) \times P_u, \quad (2)$$

여기서, BW는 MHz 단위의 신호 대역폭, Γ_m 은 적 기지국과 MU 사

이의 signal-to-jamming-plus-noise ratio (SJNR)을 의미한다. 재밍 성능이 우수할수록 Γ_m 이 감소하므로, negative의 보상 구조를 갖는다. 특히, UJ는 재밍 전력과 재밍 성능의 trade-off 관계를 고려하여 P_u 를 포함하도록 보상을 정의한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

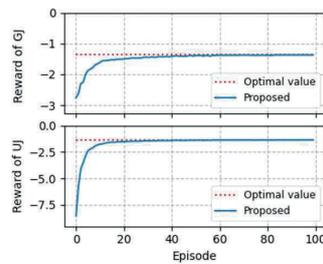


Fig. 1. Reward of GJ and UJ

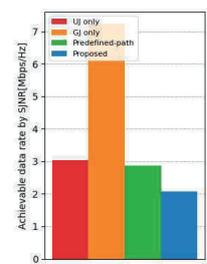


Fig. 2. Achievable data rate

140x140[m]의 아군 영역에서 [100, 170][m] 사이 고도에 UJ와 MU가 랜덤으로 배치되고, GJ가 (70, 70, 0)에 배치된 시나리오를 고려한다. 제안 방안의 경우 Fig.1과 같이 GJ와 UJ의 보상이 모두 exhaustive search 알고리즘에 따른 optimal value에 수렴하는 학습 결과를 보여줌으로써 제안 방안이 재밍 성능을 극대화하는 것을 확인하였다. 또한, Fig.2를 통해 MU가 최대 $v_u^{\max} = 10[m/iteration]$ 의 속도로 3차원 랜덤 이동을 수행하는 시나리오에서 제안 방안이 단일 재머 사용 또는 UJ 경로가 사전 정의된 알고리즘 대비 재밍 성능이 우수한 것을 보였으며, 이를 통해 3차원 공간에서 GJ와 UJ 협력 재밍의 우수성을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 LIG 넥스원 지원을 받아 수행된 연구임. (계약번호: 2022U145009)

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] S. 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.
- [3] S. 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.
- [4] J. R. Hoehn, "Defense primer: Electronic warfare," Congressional Research Service, 2022.
- [5] J. S. Yeom et al., "Performance analysis of satellite and terrestrial spectrum-shared networks with directional antenna," ETRI Journal, vol. 42, no. 5, pp. 712-720, 2020.