

적 UAV 신호 탐지와 위치 추정을 활용한 계층형 심층 강화학습 기반 협력 재밍 기법

전가겸, 정방철*, 이호원

아주대학교 전자공학과, 충남대학교 전자공학과*

{kuem0803, howon}@ajou.ac.kr, *bcjung@cnu.ac.kr,

Hierarchical DRL-Based Cooperative Jamming Using Signal Detection and Location Estimation of Malicious UAVs

Kakyeom Jeon, Bang Chul Jung*, Howon Lee

Ajou Univ., *Chungnam National Univ.

요약

본 논문은 적 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)의 신호 탐지 및 위치 추정 통해 추정된 재밍 성능 극대화를 목표로 하는 계층형 심층 강화학습 기반의 협력 재밍 기법을 제안한다. 제안 기법은 적 UAV의 위치 정보를 사전에 알 수 없는 전장 환경에서 UAV 재머가 적 UAV의 위치를 추정한 뒤 이를 지상 재머와 공유하고 협력하여 각각 이동 및 재밍 전력과 빔 폭 최적화를 통해 협력 재밍을 수행한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 기존 기법 대비 우수한 재밍 성능과 에너지 효율을 달성하며, 계층형 구조를 통해 낮은 계산 복잡도와 빠른 학습 속도를 입증하였다.

I. 서론

현대 전장에서 UAV는 3차원 이동성을 바탕으로 다양한 군사적 임무를 효과적으로 수행하고 있다[1]. 이러한 UAV에 대응하기 위해 무선 통신 시스템을 교란 및 무력화하는 재밍 기술이 핵심 기술로 부상하고 있다. 효과적인 재밍을 수행하기 위한 방식은 크게 지상 재머(GJ)와 UAV 재머(UJ)로 나뉜다. GJ는 영구적으로 전원 공급이 가능하지만, 고정된 위치로 인한 재밍 범위의 한계가 존재한다. 반면, UJ는 높은 이동성으로 적 UAV(MU)를 추적하며 재밍 할 수 있으나, 배터리 용량으로 인한 제약이 발생한다. 또한, 전장에서 MU의 위치 정보를 파악하기는 쉽지 않아 위치 추정 기술이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 MU가 송신하는 신호를 통해 위치를 추정하고, 이에 대한 재밍 성능을 바탕으로 GJ와 UJ를 활용하는 계층적 심층 강화학습 기반 협력 재밍 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 비교 방안 대비 제안 기법의 우수한 재밍 성능 및 에너지 효율과 계층적 구조에 의한 낮은 계산 복잡도 및 빠른 학습 속도를 입증하였다.

II. 본론

본 논문은 사전에 정의된 경로를 따라 비행하는 MU와 이에 대한 GJ 및 UJ의 협력 재밍 시나리오를 고려한다. GJ와 UJ는 MU의 신호 탐색 및 재밍을 수행하는 과정에서 각각 지대공 및 공대공 채널 모델을 활용한다[2][3]. UJ는 탐지된 MU의 송신 신호를 MUSIC 기반의 3차원 도래각과 신호 세기 기반의 거리를 계산하여 MU의 위치 $q_{u_m}^*$ 를 추정하고 GJ와 공유하여 협력 재밍을 수행한다[4]. GJ는 two-step 빔 패턴 모델을 기반으로 3차원 지향성 빔을 활용하며, $q_{u_m}^*$ 가 메인 로브 안에 위치하도록 빔 폭을 최적화한다[5]. MU에 대한 협력 재밍 성능은 JNR(Jamming-to-Noise Ratio)을 통해 나타내며, 이는 다음과 같이 계산된다.

$$J_{u_m} = \frac{P_{g_j} \times (L_{g_j u_m})^{-1} \times \eta_{g_j} + P_{u_j} (L_{u_j u_m})^{-1}}{\sigma_T^2}, \quad (1)$$

여기서, $(P_{g_j}, P_{u_j}), (L_{g_j u_m}, L_{u_j u_m})$ 그리고 σ_T^2 는 각각 GJ와 UJ의 재밍 전력과 채널 이득 그리고 온도 잡음 전력을 의미한다.

제안된 EHDRL-CJ는 $q_{u_m}^*$ 에 대한 E-JNR $J_{u_m}^*$ 을 극대화하는 것을 목표로 EHDRL-CJ를 제안한다. GJ를 에이전트로 하는 EDRL-GJ는 MU의 최근 경로와 빔폭, 예측 방향으로 구성된 $s_{g_j}(t) = [q_{u_m}^*(t-2, t-1, t), \theta, \varphi]$ 를 바탕으로 재밍 성능 극대화를 위한 빔폭 최적화를 진행한다. UJ를 에이전트로 하는 계층 구조의 EHDRL-UJ는 학습 주기 τ 마다 외부 RL이 동작하고 그 외에는 내부 RL이 동작한다. 내부 RL과 외부 RL은 MU의 최근 경로와 UJ의 위치 및 전력, MU의 예측 방향으로 구성된 $s_{u_j}^{in}(t) = s_{u_j}^{out}(t) = [q_{u_m}^*(t-2, t-1, t), q_{u_j}, P_{u_j}, \varphi]$ 를 바탕으로 각각 $q_{u_m}^*$ 에 근접하기 위한 이동 제어와 배터리 용량을 고려한 전력 최적화를 진행한다. EDRL-UJ는 $s_{u_j}(t) = [q_{u_m}^*(t-2, t-1, t), \varphi]$ 를 바탕으로 MU의 방향을 예측하고, $q_{u_m}^*(t+1)$ 과 유사도에 따라 높은 보상을 받는다.

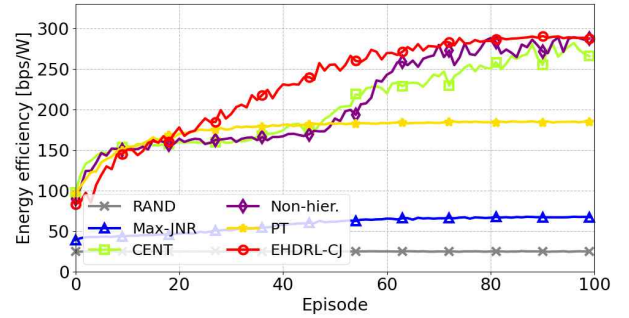


그림 1. EHDRL-CJ와 비교 방안의 에너지 효율.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

그림 1은 EHDRL-CJ와 비교 방안의 에피소드가 진행됨에 따른 에너지 효율에 관한 시뮬레이션 결과이다. 중앙 집중형 협력 재밍 기법인 CENT는 주어진 학습 시간 동안 최적값에 수렴하지 못하고, 비 계층 구조인 Non-hier는 EHDRL-CJ 대비 확연히 느린 수렴 속도를 보였다. 이를 통해 EHDRL-CJ의 분산형 구조의 이점과 계층적 구조로 인한 계산 복잡도의 감소를 확인할 수 있었다. 또한, UJ가 주어진 경로를 따라 움직이는 PT와 무작위 행동으로 재밍을 수행하는 RAND의 낮은 재밍 성능으로 EHDRL-CJ의 빔폭과 이동 및 전력 제어의 중요성을 입증할 수 있었다. 재밍 성능 극대화를 목표로 하는 Max-JNR 대비 우수한 에너지 효율의 결과를 통해 EHDRL-CJ가 UJ의 한정된 배터리 제약을 고려하면서도 우수한 협력 재밍을 수행하는 것을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. 2021-0-00794, 3차원 공간 이동통신 기술 개발, 50%)과 한국연구재단의 지원(No. 2022R1A2C1010602, 50%)을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] A. Kott, A. Swami, and B. J. West, "The Internet of Battle Things," Computer, vol. 49, no. 12, pp. 70 - 75, 2016.
- [2] S. Lee, T. Ban, and H. Lee, "Distributed Deep Reinforcement Learning-Based Energy Efficiency Maximization in 3D Cellular Networks," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 48, no. 8, pp. 942-949, 2023.
- [3] "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," document ITU-R, Recommendation P.618-13, pp. 1 - 26, 2017.
- [4] A. Vesa and A. Iozsa, "Direction-of-Arrival estimation for uniform sensor arrays," IEEE 2010 9th ISET, Timisoara, Romania, 2010.
- [5] J. S. Yeom, G. Noh, H. Chung, I. Kim, and B. C. Jung, "Performance analysis of satellite and terrestrial spectrum-shared networks with directional antenna," ETRI Journal, vol. 42, no. 5, pp. 712 - 720, 2020.