

랜덤 접속 기반 전술적 FANET에서의 하이브리드 유사 베이지안 추정 기법

김태욱*, 이준승*, 전지민**, 안재하***, 유영빈****, 이민****, 유희정****, 이호원°

Hybrid Pseudo-Bayesian Estimation in Random Access-Based Tactical FANETs

Taewook Kim*, Junseong Lee*, Jimin Jeon**, Jaeha Ahn***, Youngbin You****, Min Lee****, Heejung Yu****, Howon Lee°

요약

랜덤 접속 기반의 전술적 FANET (flying ad-hoc network)에서 빈번한 패킷 충돌은 네트워크 성능을 심각하게 저하시키므로 활성 UAV (unmanned aerial vehicle) 수를 정확하게 추정하여 패킷 충돌을 방지하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 기본 베이지안 추정 기법 (pure-Bayesian estimation)과 유사 베이지안 추정 기법 (pseudo-Bayesian estimation)을 결합한 하이브리드 유사 베이지안 추정 기반 활성 UAV 개수 예측 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안방안이 기존방안들보다 우수한 성능을 보임을 확인한다.

Key Words : UAV, Random access, Estimation error, Bayesian estimation, Tactical FANET

ABSTRACT

In random access-based tactical flying ad-hoc networks, frequent packet collisions degrade network performance severely. To prevent packet collisions, it is imperative to accurately estimate the number of active UAVs (unmanned aerial vehicles); thus, this paper proposes an estimation method for the number of active UAVs based on pseudo-Bayesian estimation by combining the pure-Bayesian method and the pseudo-Bayesian method. Through intensive simulations, it is confirmed that the proposed method outperforms the various existing methods.

1. 서론

FANET (flying ad-hoc network)이란 별도의 지상 인프라가 없이 UAV (unmanned aerial vehicle)들이 서로 통신하여 비행 및 제어 정보를 교환하고 데이터를 수집하는 네트워크를 의미한다¹⁻³. 특히, 랜덤 접속 기반 전술적 FANET은 매우 동적인 환경에서 기존의 지상 네트워크와 비교하여 높은 유연성, 비용 효율성, 적응성 등의 다양한 장점을 가지며 유망한 기술로 떠오르고 있다⁴⁻⁸. 하지만, 동적으로 변화하는 환경으로 인해 발생하는 빈번한 패킷 충돌은 UAV의 불필요한 배터리 소모를 야기하여 FANET의 라이프타임을 감소시킨다. 따라서, 랜덤 접속 네트워크의 성능을 높이기 위해 활성 UAV 수를 정확히 예측하여 패킷 충돌 빈도 수를 줄이는 것이 중요하다.

베이지안 추정 기법은 RFID (radio-frequency identification) 시스템에서 활성 태그 수를 추정하기 위해 연구되어 왔다. 기존의 기본 베이지안 추정 기법은 사전 확률을 통해 사후 확률 분포를 구해 활성 태그 수를 추정하였지만, 이는 사후 확률 분포가 누적되어 활성 태그 수가 지속적으로 변화하는 환경에서는 추정 오차가 높아지며, 계산 부하가 크다⁹. 이를 해결하기

※ 본 연구는 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. (UG223047VD)
• First Author : Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou Univ., ktw98@ajou.ac.kr, 석사과정, 학생회원
° Corresponding Author : (ORCID: 0000-0001-5509-9202) Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ., howon@ajou.ac.kr, 교수, 중신회원
* School of Electronic and Electrical Eng., Hankyong National Univ., 2016265102@hknu.ac.kr, 석사과정, 학생회원
** Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou Univ., jimin0516@ajou.ac.kr, 석사과정, 학생회원
*** (ORCID:0000-0002-0088-3136) Agency for Defense Development, anjaha@add.re.kr, 선임 연구원, 정회원
**** LIG Nex1, {youngbin.you, min.lee}@lignex1.com, 수석 연구원, 정회원
***** (ORCID:0000-0001-8046-2376) Department of Electronics and Information Engineering, Korea Univ., heejungyu@korea.ac.kr, 교수, 중신회원
논문번호 : 202311-139-B-LU, Received November 13, 2023; Revised November 26, 2023; Accepted November 26, 2023

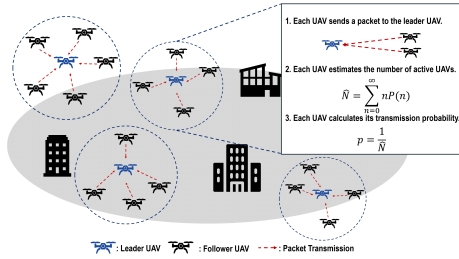


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

위해 J. Liu는 포아송 분포를 통해 사후 확률 분포를 업데이트하는 유사 베이지안 기법을 제안하여 활성 태그 수의 변화에 적응적으로 예측이 가능하도록 하였지만, 이는 다소 낮은 활성 태그 수 추정율을 보인다^[10]. 본 논문에서는 기본 베이지안 추정 기법과 유사 베이지안 추정 기법을 결합하여 동적 네트워크 환경에서 활성 UAV 개수를 정확히 추정하기 위한 하이브리드 유사 베이지안 추정 기반 활성 UAV 개수 예측 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 제안 방안

본 논문에서는 랜덤 접속 기반 전술적 FANET 환경을 고려한다. 그림 1과 같이, 모든 추종 UAV는 자신의 패킷을 리더 UAV에게 전달한다. 추종 UAV는 각 타임 슬롯마다 자신의 패킷 전송 확률에 따라 전송을 시도한다. 이때, 각 UAV들은 현재 타임 슬롯에서의 채널 이벤트를 통해 활성 UAV 수 \hat{N} 을 추정하고, 이를 이용해 다음 타임 슬롯에서 전송 확률을 결정한다. 각 추종 UAV는 이웃 UAV의 패킷 전송 여부를 감지할 수 있으며, 전송한 패킷은 외부 요소의 간섭 없이 리더 UAV에게 도달할 수 있다고 가정한다. 채널 이벤트는 성공, 충돌, 그리고 유희로 구성된다. 성공은 한 슬롯에서 한 대의 UAV가 패킷을 전송하는 경우, 충돌은 두 대 이상의 UAV가 패킷을 전송하는 경우, 그리고 유희는 어떤 UAV도 패킷을 전송하지 않은 경우이다. 기본 베이지안 추정 기법에서 채널 이벤트 E 가 주어졌을 때, 사전 확률 $P(n|E)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P(n|E) = \frac{P(E|n)P(n)}{P(E)}. \quad (1)$$

여기서, $P(E|n)$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(E|n) = \binom{n}{k} (p)^k (1-p)^{k-1}. \quad (2)$$

p 는 각 슬롯에서 UAV의 패킷 전송 확률이며, $k=0$ 이면 유희, $k=1$ 이면 성공, 그리고 $k \geq 2$ 이면 충돌인 경우를 의미한다. 또한, 활성 UAV 수 n 에 대한 E 가 발생할 전체 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P(E) = \sum_{n=0}^{\infty} P(E|n)P(n). \quad (3)$$

식 (3)에서 $P(n)$ 은 활성 UAV 수가 n 인 경우의 사전 확률을 나타낸다. 즉, 추정된 활성 UAV 수 \hat{N} 은 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{N} = \sum_{n=0}^{\infty} nP(n|E). \quad (4)$$

기본 베이지안 추정 기법은 매 슬롯에서 모든 n 에 대한 $P(n)$ 을 계산하여 계산 부하가 크다. 기본 베이지안 추정 기법의 계산 부하를 줄이기 위해, 유사 베이지안 추정 방법은 다음과 같이 사전 확률을 포아송 분포로 가정한다.

$$P(n) = \mathbb{P}(n, \nu) = \frac{\nu^n}{n!} e^{-\nu}. \quad (5)$$

위 식에서 ν 는 포아송 분포의 평균을 나타내며, 채널 이벤트에 따라 다음과 같이 조정된다.

$$\nu = \begin{cases} \nu - 1, & \text{if } E = \text{Idle}, \\ \nu, & \text{if } E = \text{Success}, \\ \nu + 2.3922, & \text{if } E = \text{Collision}. \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에서 E =유희인 경우, 추정값은 실제 값보다 크다고 가정하여 ν 를 줄인다. E =성공인 경우, 추정값은 정확하다고 가정하여 ν 를 유지한다. E =충돌인 경우, 추정값이 실제 값보다 작다고 가정하여 ν 를 증가시킨다. 유사 베이지안 추정 기법은 $P(n)$ 을 계산할 때, 포아송 분포를 사용하므로, 기본 베이지안 추정 기법에 비해 계산 복잡성 면에서 이점이 있다. 기본 베이지안 추정 기법은 각 슬롯에서 발생하는 이벤트를 누적하여 활성 UAV 수의 확률 분포를 업데이트하기 때문에 활성 UAV 수가 정적인 환경에서 높은 정확도를 보인다. 하지만 확률 분포가 특정한 활성 UAV 수로 수렴하여

본 논문에서 고려하는 동적인 환경에 적합하지 않다. 또한, 유사 베이지안 추정 방법은 기본 베이지안 추정 방법보다 계산 부하는 적지만, 불안정한 확률 분포로 인해 높은 추정 오차가 발생할 수 있다. 제안된 하이브리드 유사 베이지안 추정 기법은 기본 베이지안 추정 기법처럼 사전확률로 사후확률을 계산하다 $\text{mod}(t, \epsilon) = 0$ 또는 $|\hat{N}(t) - \hat{N}(t-1)| > v_{th}$ 의 조건을 만족하는 경우에 해당 슬롯에서 유사 베이지안 추정 기법처럼 사후확률을 포아송 분포로 업데이트한다. 이때, t 는 슬롯 인덱스, ϵ 은 유사 베이지안 업데이트 주기, v_{th} 는 업데이트 임계값을 나타낸다. 이를 통해, 제안 방안은 동적으로 변화하는 FANET 환경에서도 기존 방안 대비 활성 UAV의 개수에 대한 정확한 예측이 가능하다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

네트워크 변화에 따른 제안방안의 성능을 분석하기 위해 UAV 수는 변화 주기 (β)마다 변화 단위 (α)만큼 증가하거나 감소한다. 시뮬레이션은 활성 UAV 수의 최대값과 최소값이 각각 50과 10으로 설정되며, 제안방안의 ϵ 과 v_{th} 가 각각 50과 10으로 설정된 환경에서 수행되었다. 그림 2와 그림 3은 각 α 와 β 에 따른 각 기법들의 추정 오차율을 나타낸다.

그림 2는 β 를 50으로 고정시켜 얻은 결과이며, α 가 증가함에 따라 모든 기법의 추정 오차가 증가함을 확인할 수 있다. 기본 베이지안 추정 기법은 누적된 사전 확률을 기반으로 활성 UAV 수를 추정하기 때문에 $\alpha=0$ 인 경우에는 4.34%로 가장 낮은 추정오차를 보이지만 $\alpha=10$ 인 경우에 $\alpha=0$ 인 경우보다 31.64% 증가한 오차율을 가진다. 유사 베이지안 추정 기법은 이전 슬롯

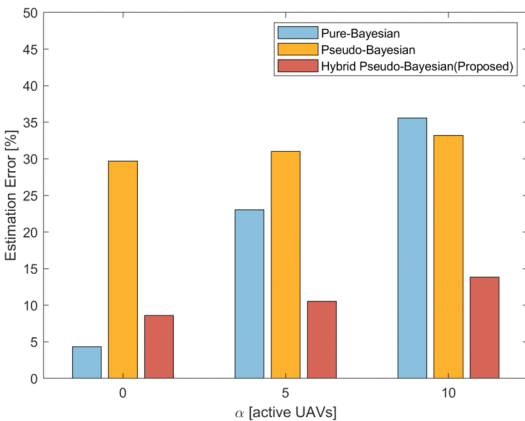


그림 2. 추정 오차 vs. α
Fig. 2. Estimation error vs. α

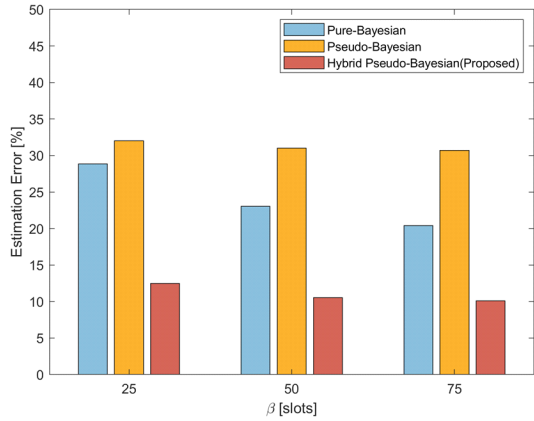


그림 3. 추정 오차 vs. β
Fig. 3. Estimation error vs. β

에서 발생한 채널 이벤트만을 통해 \hat{N} 을 결정하므로 활성 UAV 수의 변화에 적응적이지만 상대적으로 높은 추정 오차를 가진다. 제안된 하이브리드 유사 베이지안 추정 기법은 $\alpha=10$ 일 때 13.84%의 가장 낮은 추정 오차를 보인다. 그림 3은 α 를 5로 고정한 결과이며, β 가 증가함에 따라 모든 기법의 추정 오차가 감소함을 확인할 수 있다. 특히, $\beta=25$ 일 때 기본 베이지안 추정 기법, 유사 베이지안 추정 기법은 10.12%의 오차율을 가지는 제안방안 보다 각각 16.36%, 19.34% 더 높은 추정 오차를 갖는다. 시뮬레이션을 통해 제안방안이 기존의 베이지안 추정 기법들과 비교하여 매우 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

References

- [1] H. S. Park, et al., "Design and implementation of a routing metric for FANETs," *J. KICS*, vol. 48, no. 7, pp. 830-832, Jul. 2023. (<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.7.830>)
- [2] H. Lee, et al., "Towards 6G hyper-connectivity: Vision, challenges, and key enabling technologies," *IEEE/KICS J. Commun. Netw.*, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, Jun. 2023. (<https://doi.org/10.23919/JCN.2023.0000006>)
- [3] J. S. Lee, et al., "Performance analysis of cooperative dynamic-framed slotted ALOHA based on random transmit power control in A2G communication networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 106699-106707, Oct. 2022.

- (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3211943>)
- [4] X. Qiu, et al., "Maintaining links in the highly dynamic FANET using deep reinforcement learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 3, pp. 2804-2818, Mar. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3217888>)
- [5] H.-H. Choi, et al., "Idle-less Slotted ALOHA Protocol for Drone Swarm Identification," *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 72, no. 8, pp. 11080-11085, Aug. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3261104>)
- [6] E. Kim, et al., "HiMAQ: Hierarchical Multi-agent Q-Learning-Based Throughput and Fairness Improvement for UAV-aided IoT Networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 223, Mar. 2024.
(<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103813>)
- [7] 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.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3161260>)
- [8] 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.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3113128>)
- [9] Q. Tong, et al., "Dynamic framed slotted ALOHA algorithm based on bayesian estimation in RFID system," in *Proc. 2009 WRI World Congr. Comput. Sci. Inf. Eng.*, pp. 963-969, Los Angeles, California USA, Apr. 2009.
(<https://doi.org/10.1109/CSIE.2009.248>)
- [10] J. Liu, et al., "A simple pseudo-bayesian backoff algorithm for unsaturated slotted CSMA systems," in *Proc. 2018 IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1-5, Porto, Portugal, Jul. 2018.
(<https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2018.8417716>)