

FANET에서 이웃 UAV 특성을 고려한 확률론적 중계 UAV 선정 기법 성능 분석

김유빈*, 이예린*, 전지민*, 최정욱**, 박수범**, 정방철***, 이호원°

Performance Analysis of Probabilistic Relay UAV Selection Method Considering Neighbor UAV Characteristics in FANETs

Youbin Kim*, Yerin Lee*, Jimin Jeon*, Jungwook Choi**, Soobum Park**, Bang Chul Jung**, Howon Lee°

요약

FANET (flying ad-hoc network)에서는 커버리지 확률을 높이고 불필요한 패킷 전송을 줄이기 위해 효율적으로 중계 UAV (unmanned aerial vehicle)를 선택하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 FANET에서 중복 전송으로 인한 네트워크 성능 저하를 최소화하기 위해 공유 자식 및 단독 자식을 고려한 확률론적 중계 기법을 제안한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 제안방안이 다양한 벤치마크 방안 대비 총 패킷 전송 횟수, 커버리지 확률 및 에너지 효율성 측면에서 우수한 성능을 가짐을 검증한다.

Key Words : FANET, UAV, aerial relay selection, uncovered neighbor, probabilistic relay

ABSTRACT

In FANETs (flying ad hoc networks), efficient and effective relay selection is crucial to increase coverage probability while reducing unnecessary packet transmissions. This paper proposes a probabilistic relay node selection method considering uncovered neighbors to minimize network performance degradation caused by coverage overlaps and redundant packet transmissions. Through various simulations, it is shown that the proposed method outperforms benchmark methods in terms of total number of packet transmission, coverage probability, and energy efficiency.

1. 서론

다수의 UAV (unmanned aerial vehicle)로 구성된 FANET (flying ad-hoc network)은 특별한 인프라 없이 사용할 수 있는 동적 네트워크이며, 최근 배치 용이성, 확장성, 비용 및 지연 시간 감소와 같은 다양한 이점으로 상당한 주목을 받고 있다. 그러나 FANET에서는 UAV의 높은 이동성으로 인한 동적 네트워크 토폴로지 특성으로 패킷 중복 문제가 매우 빈번히 발생한다. 이는 UAV의 제한된 온보드 배터리 용량으로 운영시간 제약 문제를 갖는 배터리에 추가적인 부담을 야기하게 된다¹⁻⁵. 따라서, UAV의 커버리지 확률 성능 저하, 에너지 소비 최소화 그리고 효율적인 다중 홉 통신과 같은 UAV의 성능 향상을 위한 연구가 활발히 수행되고 있다⁶⁻⁸. 구체적으로, GPS 정보를 활용하여 UAV간 무선 링크 품질 변화를 예측하는 predictive-optimized link-state routing (P-OLSR) 연구가 수행되었다⁹. 또한, 중계 UAV의 추가 커버리지 비율과 연결 계수를 기반으로 재방송 확률을 결정하는 neighbor-based probably broadcast (NPB) 연구가 수행되었다¹⁰.

※ This work was supported by Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement-Grant funded by the Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (KRIT-CT-21-030).

• First Author : Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou Univ., youbin1323@ajou.ac.kr, 석사과정, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID: 0000-0001-5509-9202) Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, howon@ajou.ac.kr, 교수, 종신회원

* Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou Univ., {yerin1205, jimin0516}@ajou.ac.kr, 석사과정, 학생회원

** LIG Nex1, {jungwook.choi2, sbpark93}@lignex1.com 수석 연구원

*** (ORCID:0000-0002-4485-9592) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 교수, 종신회원

논문번호 : 202401-001-C-LU, Received December 28, 2023; Revised January 22, 2024; Accepted January 22, 2024

비록, [9]에서는 FANET의 동적 토폴로지 예측으로 중복 전송을 최소화하였지만, UAV의 제한된 페이지 용량으로 GPS를 사용하기 때문에 정보 전달은 추가적인 에너지 소비를 야기한다. [10]에서는 패킷 전송 비율을 개선하였지만, UAV의 2차원 이동성과 위치 변화가 크지 않은 환경에서만 시뮬레이션이 수행되었다. 또한, 네트워크의 특성을 반영하지 않는 고정된 연결 계수는 동적 특성을 갖는 FANET 환경에는 적합하지 않다. 이에 따라, 본 논문은 다중-홉 FANET의 중복 전송으로 인한 에너지 소비를 최소화하기 위해 확률론적 최적 중계 UAV 선정 기법을 제안한다. 구체적으로, 제안방안은 패킷을 더 넓은 영역으로 전달할 수 있는 UAV를 중계 UAV로 고려하며 커버리지 확률 저하를 최소화하면서 불필요한 전송을 줄이기 위한 확률론적 중계 결정 기법을 추가적으로 도입한다. 또한, 조정 가능한 가중치 요소를 통해 FANET 환경의 다양한 특성(i.e., 밀도, 속도, etc.)에 유연하게 대처할 수 있다.

본 논문의 2장에서는 시스템 모델 및 제안방안에 관해 설명하고, 3장에서는 벤치마크 방안 및 제안방안의 시뮬레이션 결과 및 결론을 기술한다.

II. 시스템 모델 및 제안방안

본 논문에서는 그림 1과 같이 다중 홉 FANET 환경에서 브로드캐스트 기반 패킷 전파 시나리오를 고려한다.

2.1 중계 결정 요소 설계

제안방안에서 i 번째 UAV n_i 중계 UAV 후보 결정을 위한 중계 결정 요소 (relay decision factor, RDF)는 다음과 같이 계산된다.

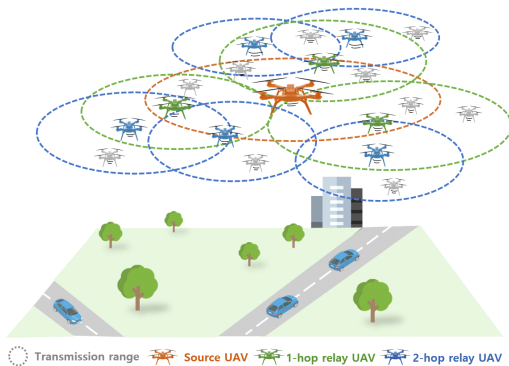


그림 1. 다중 홉 FANET 시스템 모델.
Fig. 1. System model of multi-hop FANET.

$$R(n_i) = w_s \times \frac{|N_{S_s}(n_i)|}{|N_{tot}(n_i)|} + w_u \times \frac{|N_u(n_i)|}{|N_{tot}(n_i)|}, \quad (1)$$

여기서, $N_{tot}(n_i)$, $N_{S_s}(n_i)$, $N_u(n_i)$ 는 각각 n_i 의 전체 자식 집합, 공유 자식 집합, 단독 자식 집합을 의미한다. 전체 자식은 n_i 의 전송 범위에 포함되는 UAV 중 부모 UAV의 전송 범위에 포함되지 않은 UAV를 의미한다. 또한, 전체 자식은 n_i 의 동일 홉 UAV의 전송 범위에 포함되는 UAV를 공유 자식으로, 포함되지 않은 UAV를 단독 자식으로 하위 분류된다. UAV의 밀도에 따라 공유 자식과 단독 자식의 발생 빈도는 달라지기 때문에 공유 자식의 가중치 요소 w_s 와 단독 자식의 가중치 요소 w_u 를 통해 다양한 환경에 유연한 대처를 위한 세부 조정이 가능하다. 만약 $R(n_i)$ 이 RDF 임계값 (R^{th})보다 크거나 같다면, UAV n_i 가 현재 패킷에 대한 중계 UAV 후보로 결정된다.

2.2 확률론적 중계 결정 기법

전송 범위가 중복되어 부모 UAV의 수가 많아질수록 불필요한 중복 전송이 증가하여 에너지 효율에 악영향을 미치기 때문에 이를 최소화하는 것이 우선시되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 부모 UAV의 수가 증가할수록 자신의 중계 확률 임계값 ($P^{th}(n_i)$)이 낮아지도록 하는 확률론적 중계 결정 기법을 정의한다. 식(1)을 통해 중계 UAV 후보로 선정된 UAV n_i 는 다음과 같이 $P^{th}(n_i)$ 을 계산한다.

$$P^{th}(n_i) = |N_p(n_i)|^{-1}, \quad (2)$$

여기서, $|N_p(n_i)|$ 는 n_i 의 부모 UAV 수를 나타낸다. 만약 0에서 1 사이의 값으로 설정된 $P(n_i)$ 가 $P^{th}(n_i)$ 보다 작거나 같으면 UAV n_i 는 최종적으로 중계 UAV가 된다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

시뮬레이션은 $1000m \times 1000m$ 의 전체 네트워크 영역, $300m$ 의 전송 반경, $w_s = 0.5$, $w_u = 0.5$, $R^{th} = 0.1$, 그리고 UAV 최대 속도 $v_{max} = 25m/s$ 인 환경에서 1000번의 에피소드에 대해 수행되었다. 성능 분석을 위해 플러딩 (flooding, FL), 확률론적 브로드캐스트 (probabilistic broadcast, PB), 중계 UAV 개수 고정 (selected fixed-number relay, SFR), 그리고

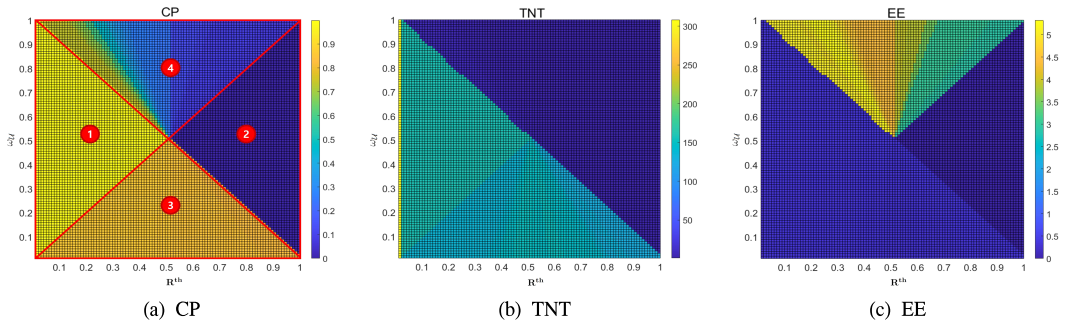


그림 2. w_u 와 R^{th} 의 변화에 따른 제안방안의 시뮬레이션 결과 (a) CP (b) TNT (c) EE.
 Fig. 2. (a) CP, (b) TNT, and (c) EE of proposed method according to variations in w_u and R^{th} .

NPB를 벤치마크 방안으로 고려하였다. 여기서, SFR 방안은 i 번째 홉의 송신 UAV가 단독 자식을 고려하여 미리 정해진 개수의 $(i+1)$ -홉의 중계 UAV를 선택하며, NPB 방안은 패킷을 수신하지 않은 이웃 UAV를 사용하여 패킷 재방송 지연을 결정하고 추가 커버리지 비율과 연결 계수를 통해 재방송 확률을 결정한다. 또한, 각 방안의 성능 비교를 위해 총 패킷 전송 수 (total number of packet transmissions, TNT), 커버리지 확률 (coverage probability, CP) 그리고 에너

지 효율 (energy efficiency, EE)을 성능지표로 고려하였다. 그림 2는 RDF의 다양한 가중치 요소 조합에 따른 제안방안의 성능을 분석하기 위해 CP, TNT, EE를 3차원으로 나타낸 그래프이다. x, y, z 축은 각각 R^{th} , $w_u = 1 - w_s$, 그리고 각 성능지표를 나타낸다. 그림 2-(a)에서 각 영역은 RDF 조합에 따라 나뉜다. 영역 1은 $R^{th} \leq \min(w_s, w_u)$, 영역 2는 $R^{th} \geq \max(w_s, w_u)$, 영역 3과 4는 각각 $w_u \leq R^{th} \leq w_s$ 과 $w_s \leq R^{th} \leq w_u$ 인 영역이다. 영역 1은 CP가 0.99이지만 EE가 0.32로 낮고 영역 2는 R^{th} 가 비교적 높기 때문에 CP가 0으로 수렴한다. 영역 3은 0.83 ~ 0.87의 CP를 가진다. 이를 통해 자식 UAV의 상당한 비율을 차지하는 공유 자식이 CP의 증가에 큰 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. 영역 4의 CP는 0.08 ~ 0.74이다. 이 영역에서 w_u 가 증가함에 따라 $R(n_i)$ 가 R^{th} 를 넘지 못하는 경우가 발생하여 R^{th} 가 증가함에 따라 CP가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-(a)는 각 방안들의 CP를 나타낸다. FL은 패킷을 수신한 모든 UAV가 패킷을 전송하기 때문에 CP 측면에서 가장 높은 값을 가지게 된다. 시뮬레이션 결과를 통해 모든 환경에서 제안방안의 CP가 FL과 근사한 것을 확인할 수 있으며, 100개의 UAV에서 FL, PB, SFR, NPB, Proposed의 CP는 각각 0.9984, 0.8907, 0.9604, 0.9963, 0.9970의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 3-(b)는 각 방안들의 TNT를 나타낸다. UAV 밀도가 증가함에 따라 모든 방법의 TNT는 증가하며 FL은 가장 큰 TNT를 갖는다. 제안방안은 모든 벤치마크 대비 가장 낮은 TNT 값을 가지며, 100개의 UAV에서 FL, PB, SFR, NPB, Proposed의 TNT는 각각 1750.9, 146.3770, 144.1000, 242.0140, 73.5620의 값을 가진다. 그림 3-(c)는 각 방안들의 EE를 나타낸다. 100개의 UAV에서 FL, PB, SFR, NPB, Proposed의 EE는 각각

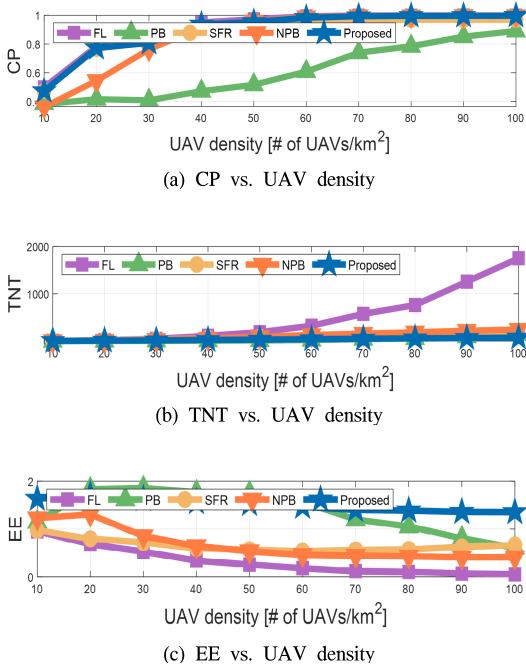


그림 3. 제안방안 및 벤치마크 방안의 UAV 밀도 변화에 따른 시뮬레이션 결과 (a) CP vs. UAV density (b) TNT vs. UAV density (c) EE vs. UAV density.
 Fig. 3. (a) CP vs. UAV density, (b) TNT vs. UAV density, and (c) EE vs. UAV density according to UAV density of the benchmark and proposed methods.

0.0570, 0.6085, 0.6658, 0.4117, 1.3553의 값을 가진다. 제안방안은 0.9970의 높은 커버리지 확률을 가지지만 73.5620의 낮은 TNT를 가져 우수한 EE를 가짐을 보여준다. 시뮬레이션 결과를 통해 RDF와 확률론적 중계 결정 기법을 고려한 제안방안이 다른 벤치마크 방안들보다 다양한 환경에서 우수한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

References

- [1] S. Jeong, et al., "Performance analysis of routing protocol according to UAV density in FANET-based multi-UAV system communication," *J. IEIE*, vol. 57, no. 6, pp. 11-16, Jun. 2020.
(<https://doi.org/10.5573/ieie.2020.57.6.11>)
- [2] S. Lee, et al., "Multiagent Q-learning-based multi-UAV wireless networks for maximizing energy efficiency: Deployment and power control strategy design," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 9, pp. 6434-6442, May. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3113128>)
- [3] 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.2023.000006>)
- [4] H. Seong, et al., "FiFo: Fishbone Forwarding in Massive IoT Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 4339-4352, Mar. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3216947>)
- [5] 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>)
- [6] J. Lee, et al., "Performance Analysis of Cooperative Dynamic Framed Slotted-ALOHA With Random Transmit Power Control in A2G Communication Networks," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 106699-106707, Oct. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3211943>)
- [7] S. Lim, et al., "Optimal Tethered-UAV Deployment in A2G Communication Networks: Multi-Agent Q-Learning Approach," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 19, pp. 18539-18549, Oct. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3161260>)
- [8] H. -H. Choi, et al., "Idle-Less Slotted ALOHA Protocol for Drone Swarm Identification," in *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 11080-11085, Aug. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3261104>)
- [9] S. Rosati, et al., "Dynamic routing for flying ad hoc networks," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 3, pp. 1690-1700, Mar. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2414819>)
- [10] W. Liu, et al., "A Neighbor-based probabilistic broadcast protocol for data dissemination in mobile IoT networks," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12260-12268, Mar. 2018.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808356>)