

UAV Ad-hoc 네트워크 환경에서의 SINR 기반 순차적 슬롯 재사용 기법

김민준, 박지홍*, 김재현

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI융합네트워크학과

{lakanica2000, *jihong1215, jkim}@ajou.ac.kr

SINR-Based Sequential Slot Reuse Mechanism for UAV Ad-hoc Networks

Min-Jun Kim, Ji-Hong Park, Jae-Hyun Kim

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

*Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University

요약

본 논문에서는 UAV Ad-hoc 네트워크 환경에서 기존 TDMA의 고정 슬롯 할당으로 인한 문제점인 모든 UAV가 패킷을 지상체까지 전송할 때 걸리는 총 전송시간 증가 문제를 최소화하기 위해 SINR 기반 순차적 슬롯 재사용 기법을 제안하였다. 성능 분석 결과, 제안하는 기법이 기존 TDMA 대비 평균 중단 간 지연을 약 61% 감소시키고, 시스템 총 처리율을 약 3배 향상시켰다.

I. 서론

UAV (Unmanned Aerial Vehicle)는 군사 및 민간 분야에서 그 활용도가 폭발적으로 증가하고 있으며, 효율적이고 안정적인 임무 수행을 위해 편대 단위로 운용한다[1]. UAV 편대는 지상체와 직접 통신이 어려운 경우, 노드 간 릴레이를 거치는 Ad-hoc 방식으로 연결된다. Ad-hoc UAV 네트워크는 TDMA (Time Division Multiple Access) 기반의 고정된 타임 슬롯 사용으로 안정적인 QoS (Quality of Service)를 보장하는 장점이 있지만, 다중 홉 경로에서 슬롯 대기 시간 누적에 의한 중단 간 지연 증가 문제와 재사용 가능한 슬롯을 활용하지 않아 높은 프레임당 슬롯 수의 단점이 존재한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 UAV Ad-hoc 네트워크 환경에 적합한 TDMA 슬롯 할당 기법이 필요하다.

본 논문은 경로 정보에 의한 슬롯 순차 할당과 SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) 기반 타임슬롯 재사용을 통한 효율적인 TDMA 슬롯 할당 기법을 제안한다.

II. 본론

가. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 원형 임무 반경 R_{oper} 내에 M 개의 UAV 클러스터가 지상체까지 Ad-hoc 방식으로 연결된 환경을 고려한다. 각 클러스터는 그림 2와 같이 클러스터 헤드 (CH, Cluster Head) 무인기 1대와 일반 무인기 4대로 구성되며, CH를 중심으로 일반 무인기가 통신 거리 R_{comm} 내에 배치되며 데이터를 전달하는 통신 게이트웨이 역할을 수행한다. 클러스터 i 가 지상체 n_0 로부터 목적지 노드 n_H 까지의 최단 경로 $p_i = (n_0, n_1, \dots, n_H)$ 로 구성된 전체 경로 집합은 $P = (p_1, p_2, \dots, p_M)$ 이다. 이때, 전체 경로에 대해 단일 프레임으로 데이터가 전달되기 위해서는 클러스터의 타임슬롯 번호 $s_{i,k}$ 에 대해 식 (1)을 만족해야한다.

$$S, \quad s_{i,k} > s_{i,k-1}, \quad \forall i, \quad k = 1, \dots, H. \quad (1)$$

p_i 에서 요구되는 프레임 수는 $F(p_i)$ 로 정의하고, P 가 패킷을 전송하는 데 필요한 프레임 수 F_{total} 는 식 (2)와 같다. 클러스터 i 에서 수신 노드

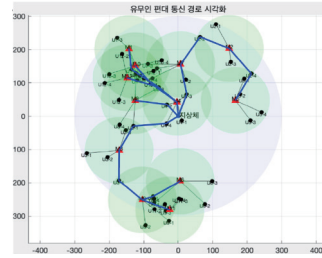


그림 1. 편대와 지상국 간의 릴레이 과정

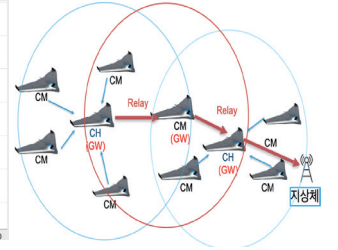


그림 2. UAV Ad-hoc 네트워크 토폴로지

j 로 송신할 때, j 의 수신 SINR은 경로 손실과 간섭을 반영하여 식 (3)으로 정의한다. I_i 는 슬롯 $s_{i,k}$ 를 공유하는 간섭 클러스터의 집합이다[2].

$$F(p_i) = 1 + \sum_{k=1}^H \delta(s_{i,k} \leq s_{i,k-1}), \quad F_{total} = \max_{p_i \in P} F(p_i), \quad (2)$$

$$SINR_{ij} = \frac{P_t d_{i,j}^{-\alpha}}{\sum_{k \in I_i} P_t d_{k,j}^{-\alpha} + N_0}. \quad (3)$$

나. SINR 기반 순차적 슬롯 재사용 기법



그림 3. 제안 기법의 타임슬롯 최적화 흐름도

제안하는 기법은 그림 3의 절차로 진행된다. UAV의 위치와 최단 경로를 기반으로 식 (1) 조건의 홉 기반 순차적 슬롯 할당을 진행하고, SINR 기반 슬롯 재사용을 통해 S 값을 최소화하는 방향으로 진행한다. 최종적으로 Ad-hoc 네트워크에 최적화된 타임 슬롯 프레임 구조를 설계하여 총 전송 시간 $\min_{P,S} (F_{total} \cdot S_{frame} \cdot T_{slot})$ 을 달성하는 것이 최종 목표이다.

(i) 홉 기반 순차적 슬롯 할당

각 클러스터는 지상체까지의 최단 경로 p_i 를 기준으로, 지상체에 가까

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	기호	값	파라미터	기호	값
편대 수	M	8~24	잡음 전력	N_0	0.1 pW
임무반경	R_{oper}	300 km	송신 전력	P_t	10 W
통신 거리	R_{comm}	70~190 km	대역폭	B	1 GHz
슬롯 시간	T_{slot}	5 ms	경로 손실 지수	α	2
페이로드	P_{bits}	10 Mb	SINR 임계값	γ_{th}	10 dB

운 클러스터보다 앞서지 않도록 슬롯을 순차적으로 배정한다. 이를 통해 식 (1)의 순서 조건을 강제하여 모든 경로가 식 (4)를 만족하게 한다.

$$F_{total} = 1, \quad F(p_i) = 1, \quad \forall p_i \in P. \quad (4)$$

(ii) SINR 기반 슬롯 재사용

동일 슬롯 s 를 공유하는 클러스터 집합을 C_s 라 한다. 클러스터의 모든 수신 노드 j 에 대해 식 (5)를 만족하면 슬롯 s 를 재사용할 수 있다.

$$SINR_{ij} \geq \gamma_{th}, \quad \forall i \in C_s, \quad \forall i \in R_i, \quad (5)$$

타임슬롯 집합에서 재사용 가능한 슬롯은 식 (6)과 같이 표현된다. 이를 통해 전체 슬롯 수 S 를 재사용 조건에서 최소화하여 프레임 길이를 단축한다.

$$S = \min(s \mid SINR_{ij} \geq \gamma_{th}), \quad \forall i \in C_s, \quad \forall s \in S. \quad (6)$$

다. 성능 분석

제안하는 SINR 기반 순차적 슬롯 재사용 기법의 성능 분석을 위해 표 1의 시뮬레이션 파라미터를 사용한다. BFS 최단 경로 계산으로 지상체와 통신 경로를 도출하였으며 제안하는 기법의 성능을 TDMA, 순차적 슬롯 할당 기법 (Sequential)과 비교한다. TDMA는 고정 슬롯을 할당하는 방식, Sequential은 홉 수 기준으로 슬롯을 순차적으로 할당하는 방식이다. 통신 거리(80~180km)와 편대 수(8~25)를 변경하며 각 기법의 성능을 분석한다. 주요 성능 지표는 중단 간 지연 시간, 처리율, 프레임 수 (F_{total})이며, 각 결과는 MATLAB으로 1000회 반복 시뮬레이션을 수행하여 얻은 평균값이다. 중단 간 지연은 모든 UAV 편대가 임무 데이터를 동시에 생성했을 때, 해당 데이터가 지상체에 도달하는 데 걸리는 평균 시간을 의미한다. 이는 네트워크의 홉 기반 전송 효율과 경로 최적화를 반영한다. 처리율은 주어진 시간 동안 네트워크 전체가 성공적으로 지상체까지 전달한 데이터양을 나타내며, 슬롯 재사용과 프레임 효율성을 평가하는 지표이다.

그림 4는 통신거리에 따른 중단 간 지연 시간 평균이다. 편대의 수가 12대, R_{comm} 이 100km일 때 제안하는 기법은 Sequential, TDMA에 비해 중단 간 지연 시간이 14%, 61% 감소하였다. 이는 제안하는 기법이 홉 기반 순차적 슬롯 할당으로 인해 단일 프레임 내에서 다중 홉 전송이 가능했기 때문이다. 막대그래프는 F_{total} 를 의미하며 이 값이 제안하는 기법과, Sequential은 1로 고정된 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 통신거리에 따른 처리율을 나타낸다. 제안하는 기법은 Sequential, TDMA 대비 29%, 3배 증가하였다. SINR 임계값 조건을 만족하는 클러스터 간 슬롯 재사용으로 여러 편대가 동시에 데이터를 전송할 수 있어 단일 프레임 내 처리율이 극대화된 결과이다. 통신거리가 증가하면 방식에 상관없이 Ad-hoc 통신을 진행하지 않고 단일 프레임 내에서 지상체와 직접 통신하는 확률이 증가하기 때문에 일정한 값으로 수렴하는 형태가 나타난다. 결과적으로 제안하는 기법이 네트워크의

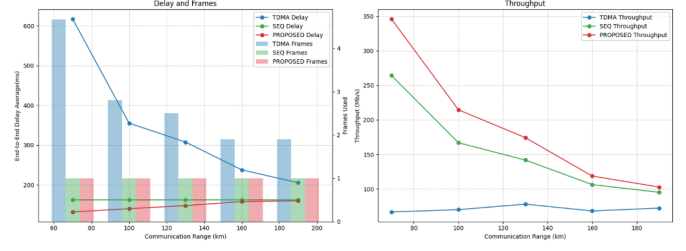


그림 4. 통신거리에 따른 중단 간 지연 시간

그림 5. 통신거리에 따른 처리율

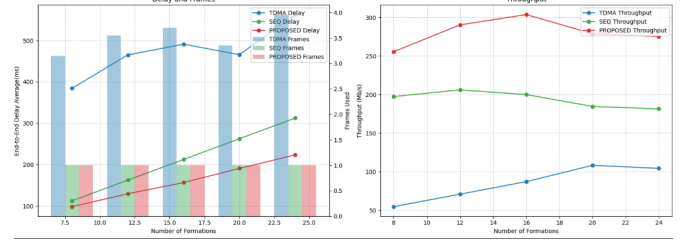


그림 6. 노드 수에 따른 중단 간 지연 시간

그림 7. 노드 수에 따른 처리율

지연을 최소화하고 처리율을 향상하는 효과를 나타냄을 확인하였다.

그림 6은 편대 수에 따른 중단 간 지연 시간이다. 편대의 수가 20대, R_{comm} 이 100km일 때 제안하는 기법은 Sequential, TDMA에 비해 중단 간 지연 평균이 27%, 59% 감소하였다. TDMA는 편대 수 증가로 F_{total} 이 증가하여 지연이 가장 크게 나타난다. 반면 제안하는 기법과 Sequential 방식은 편대 수의 변화와 무관하게 F_{total} 가 항상 1의 값을 유지한다.

그림 7은 노드 수의 변화에 따른 처리율의 변화를 나타낸다. 제안하는 기법은 Sequential, TDMA에 비해 51%, 2.6배 증가하였다. SINR 기반 슬롯 재사용으로 다수 편대가 동시 전송이 가능하지만, 편대 수가 많아지면 슬롯 재사용할 수 있는 쌍이 상대적으로 줄어들기 때문에 단일 프레임에서 처리율이 감소하는 경향을 보인다. 결과적으로 제안하는 기법이 노드 수가 증가하는 상황에서도 다른 기법보다 네트워크의 지연과 처리율이 향상되었다.

제안한 기법은 시뮬레이션에서 우수한 성능을 보였으나, 실제 환경에서 UAV 위치 정확도와 연산 오버헤드 등의 영향으로 성능이 이론치보다 낮아질 수 있으니, 이러한 제약을 고려할 필요가 있다.

III. 결론

본 논문에서는 UAV Ad-hop 네트워크 환경에서 SINR 기반 TDMA 프레임 최적화 기법을 제안하였다. 홉 수를 기반으로 타임슬롯을 순차적으로 할당되도록 하여 지상체와 무인기가 단일 프레임에 연결되도록 하였다. 또한 SINR 기반 슬롯 재사용을 통해 타임슬롯의 수를 최소화하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 기법이 TDMA 대비 홉 수가 많고 제한된 통신 거리에서 데이터 전송 및 자원 활용이 효율적임을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김태운, 이원재, 김재현, “군집 단말 UAV 지원 네트워크 환경에서의 순차 기반 Hybrid MAC 프로토콜 설계,” 한국군사과학기술학회 종합 학술대회, 2022.
- [2] O. Goussevskaya, M. M. Halldorsson, and R. Wattenhofer, “Algorithms for Wireless Capacity,” arXiv: 1203.0536, 2012.
- [3] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANET): A survey,” Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270, 2013.