

UAV 군집 통신을 성능 향상을 위한 저복잡도 주파수 할당 알고리즘

윤장혁, 송용진, 정방철

아주대학교

jhyoun@ajou.ac.kr, wiclyjsong@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

A Low-Complexity Frequency Allocation Algorithm for Performance Enhancement in UAV Swarms Communications

Janghyuk Youn, Yong-Jin Song, Bang Chul Jung

Ajou University

요약

본 논문에서는 다수의 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 군집이 동일 공간에서 협력적으로 운용되는 환경에서, 군집별로 1개의 채널을 할당하는 문제를 다룬다. 가용 채널 수가 부족할 때 효율적으로 채널을 재사용하는 4종의 정렬 기반 휴리스틱을 제안하고, Exhaustive search를 비교군으로 두어 임의의 토폴로지에 대해 성공률을 비교한다. 시뮬레이션 결과, 다른 군집에 미치는 간섭이 큰 순서대로 동적으로 정렬하여 할당하는 휴리스틱 알고리즘(Max Interf.)이 가장 우수하였으며, 주파수에 여유가 생기기 시작하는 영역에서는 Exhaustive search 대비 1% 이내의 격차로 근접하였다.

I. 서론

UAV 군집을 활용한 협력 임무는 재난 구역 감시, 광역 측량, 정밀 농업, 산업 시설 점검 등 다양한 응용 분야로 확장되고 있다 [1, 2]. 단일 UAV의 한정된 영역·페이로드·통신 범위 한계를 극복하기 위해 여러 대의 UAV가 군집(swarm)을 이루어 동작하는 패러다임이 보편화되면서, 군집 내부의 안정적이고 결정론적인(deterministic) 통신 인프라가 핵심 요소로 부각된다. 이를 위해 UAV 간 무선 통신 및 ad-hoc 네트워크 구성에 관한 광범위한 연구가 수행되어 왔으며 [3, 4], 군집 통신을 위해서는 시간 분할 접속(TDMA) 기반의 결정적 매체 접근 제어가 주로 채택된다.

다수의 UAV 군집이 인접한 공간에서 동시에 운용되는 시나리오에서는, 한 군집의 송신 신호가 다른 군집의 수신을 간섭한다. 이를 회피하기 위해 일반적으로 군집별로 서로 다른 주파수를 할당하며, 군집 내부는 TDMA로, 군집 간은 FDMA로 운용한다. 그러나 ISM 대역과 같은 비면허 주파수 자원은 매우 제한적이며 군집의 수가 가용 채널 수를 초과할 경우 일부 군집은 동일 채널을 공유하면서도 통신 품질을 유지하도록 설계되어야 한다.

이러한 채널 할당 문제는 그래프 컬러링 (graph coloring) 문제의 일반화된 형태로, 일반적으로 NP-hard에 속하며, 최적해를 찾는 Exhaustive search 방식은 군집 수와 채널 수에 대해 지수적 계산량을 요구한다. 따라서 적은 수의 채널로 다수의 군집을 동시에 운용 가능하게 하는 효율적인 휴리스틱 알고리즘이 필요하다.

본 논문은 군집의 주파수 할당을 위한 4종의 휴리스틱 알고리즘을 분석하고, Exhaustive search 방식과 비교하여 가용 채널 수에 따른 주파수 할당 성공률을 분석한다. 시스템 모델은 협력 UAV 군집의 3D free-space 통신 환경을 가정하며, worst-case TDMA 간섭 모델 하에서 min-max composition 기반의 연결성 척도 $g_{\min}$ 을 도입하여 채널 할당의 성공 여부를 판단한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템 모델에서는 총 N 개의 UAV 군집이 $X \times Y$ km 영역에 균등 분포로 배치되며, 임의의 두 군집의 중심은 최소 거리 $d_{\min}$ 이상 떨어져 있다. 각 군집 m 은 군집 중심을 기준으로 수평 반경 R 의 영역과 고도 $[h_{\min}, h_{\max}]$ m의 범위 안에 균일 분포에 따라 배치되는 $K_{UAV} \sim [20, 30]$ 개의 UAV로 구성된다. 모든 UAV는 동일한 송신

전력 P_{TX} , 그리고 수신기 잡음지수 NF 를 가진다고 가정하며, f_c 대역에서 B MHz 대역폭의 단일 채널을 사용한다고 가정한다. 하나의 군집 내부의 UAV 간 통신 방식은 TDMA 통신을 가정한다. 따라서 같은 시간 슬롯에 동일 채널을 공유하는 다른 군집으로부터의 간섭과 다른 군집에 미치는 간섭은 worst-case 간섭으로 모델링한다.

UAV 간 통신은 서로 Line-of-sight가 보장되기 때문에 채널은 3D free-space를 가정하며, 이때 경로손실은 ITU-R P.525에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$PL(d, f) = 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

여기서 d 는 km 단위 임의의 두 노드 사이의 거리를 의미하며, f 는 MHz 단위의 통신에 사용된 주파수를 나타낸다. 송신 노드 j 로부터 수신 노드 i 가 받는 신호 전력은

$$RSS_{ij} = P_{TX} - PL(d_{ij}, f) \quad [\text{dBm}] \quad (2)$$

이며, 여기서 d_{ij} 는 노드 j 와 노드 i 사이의 거리를 말한다. 군집 m 에 채널 $f(m)$ 이 할당되었을 때, 같은 채널을 공유하는 다른 군집 m' 이 군집 m 의 노드 i 에 미치는 worst-case 간섭은

$$I_i^{(m)} = \sum_{m' \neq m, f(m')=f(m)} \max_k RSS_{i m' k} \quad (3)$$

로 정의한다. i_m 은 군집 m 의 i 번째 노드를, $k_{m'}$ 은 군집 m' 의 k 번째 노드를 말한다. 송신 노드 j 에서 수신 노드 i 로의 SINR은

$$\text{SINR}_{ij}^{(m)} = RSS_{ij} - 10 \log_{10} \left(10^{I_i^{(m)}/10} + 10^{N_0/10} \right) [\text{dB}] \quad (4)$$

이며, 여기서 $N_0 = -174 + 10 \log_{10}(B) + NF$ 는 잡음 전력이다. SINR이 임계값 τ 이상일 때 링크 ($j \rightarrow i$)가 활성화되었다고 간주한다.

III. Min-Max Composition 기반 $g_{\min}$

각 군집의 multi-hop 연결성은 min-max composition을 이용하여 평가한다. 군집 m 의 1-hop SINR 행렬을 $A^{(1)} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ (n 은 군집 내 UAV 수, 대각 원소는 $-\infty$)이라 할 때, l -hop SINR 행렬은 다음과 같이 재귀적으로 정의된다.

$$A_{i,j}^{(l)} = \max_k \min(A_{i,k}^{(l-1)}, A_{k,j}^{(1)}) \quad (5)$$

식 (5)의 $A_{i,j}^{(l)}$ 는 노드 i 에서 j 까지 도달하는 모든 l -hop 경로 중, 각 경로의 가장 약한 병목 링크 중 최댓값에 해당한다. 군집 m 의 연결성 척도 $g_{\min}(m)$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$g_{\min}(m) = \max_{l \in [1, L]} \min_{i \neq j} A_{i,j}^{(l)} \quad (6)$$

여기서 L 은 최대 hop 수를 의미한다. 결론적으로, $g_{\min}(m) \geq \tau$ 이면 군집 m 의 모든 노드 쌍은 L -hop 이내에서 $\text{SINR} \geq \tau$ 의 경로를 통해 연결 가능하다는 것을 의미한다.

IV. 휴리스틱 채널 할당 알고리즘

본 논문은 4종의 휴리스틱 알고리즘을 분석한다. 모든 휴리스틱 알고리즘은 결정된 순서에 따라 군집을 하나씩 선택하고, 첫 번째 채널부터 K 번째 채널까지 차례로 시도하여 모든 군집에 대해 $g_{\min}(m) \geq \tau$ 제약을 위반하지 않는 채널을 할당한다. 만약 어느 채널에도 할당할 수 없으면 해당 알고리즘은 실패로 종료한다.

1. Max Interf.

현재 주파수가 할당되어 있지 않은 군집 중 주변 군집에 미치는 간섭량이 가장 큰 군집부터 주파수를 할당하는 방식이다.

2. Min Interf.

1번 알고리즘과 반대로 현재 주파수가 할당되어 있지 않은 군집 중 주변 군집에 미치는 간섭량이 가장 작은 군집부터 주파수를 할당하는 방식이다.

3. Max $g_{\min}$

주파수가 할당되어 있지 않은 군집 중 군집 내부 병목 SINR인 $g_{\min}$ 이 큰 순서대로 주파수를 할당하는 방식이다.

4. Min $g_{\min}$

3번 알고리즘과 반대로 $g_{\min}$ 이 작은 군집부터 주파수를 할당한다. 취약한 군집에 깨끗한 채널을 먼저 부여하는 개념이다.

V. 시뮬레이션 결과

4개의 휴리스틱 알고리즘을 검증하기 위해 수행한 시뮬레이션 파라미터는 다음 표와 같다.

항목	값	항목	값
N	9	$X \times Y$ [km]	10x10
$d_{\min}$ [km]	2	R [km]	1.5
$h_{\min}$ [m]	50	$h_{\max}$ [m]	300
f_c [GHz]	2.4	B [MHz]	20
P_{TX} [dBm]	20	NF [dB]	5
τ [dB]	10	L	4

그림 1은 주어진 총 주파수 개수 대비 주파수 할당 성공률을 그린 것이다. $K \leq 3$ 영역은 채널 수가 절대적으로 부족하여 Exhaustive search조차 성공하는 경우가 거의 없는 것을 확인할 수 있고 $K \geq 4$ 영역에서부터 유의미한 알고리즘 사이 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다.

최적의 성능을 달성하는 Exhaustive search 대비 4개의 휴리스틱 알고리즘 중 Max Interf. 방식이 가장 높은 성능을 달성하는 것을 확인할 수 있으며 이 경향은 모든 주파수 개수에서도 성립하는 것을 알 수 있다. 특히 5개의 주파수를 쓸 수 있을 때 Max Interf. 방식은 거의 Exhaustive search 방식의 성능에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

Max Interf. 방식이 일관되게 높은 성공률을 달성하는 것은 주변에 영향을 미치는 군집에 주파수를 먼저 할당함으로써 적은 주파수 안에서 선택해야 하는 후속 군집들의 부담을 줄여주기 때문이며, Min Interf. 방식이 최악의 성공률을 달성하는 것은 그 반대로 설명할 수 있다.

다른 3개의 휴리스틱 알고리즘들은 Max Interf. 방식 대비 성능이 떨어지는데, 특이한 점은 $g_{\min}$ 기반의 두 알고리즘의 경향이다. $K = 4$ 까지는

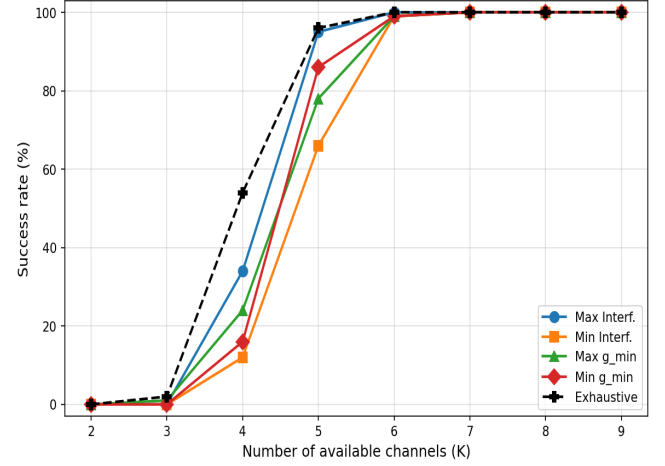


그림 1. 주파수 개수 대비 주파수 할당 성공률

Min $g_{\min}$ 방식이 Max $g_{\min}$ 방식 대비 낮은 성공률을 기록하는데, $K = 5$ 부터는 Min $g_{\min}$ 방식이 Max $g_{\min}$ 방식보다 높은 성능을 달성하는 것을 확인할 수 있다. 이는 주파수 자원이 부족할 때는 견고한 군집에 먼저 주파수를 할당하는 것이, 반대로 주파수 자원이 여유로울 때는 취약한 군집에 먼저 주파수를 할당하는 것이 성공률을 높일 수 있는 방법임을 시사한다.

III. 결론

본 논문은 다수의 UAV 군집이 동일 공간에서 협력적으로 운용되는 환경에서, 군집당 1개의 채널을 할당하는 문제를 다루었다. 주파수 할당 순서의 차이에 따른 4종의 휴리스틱 알고리즘과 Exhaustive search 알고리즘을 100개의 임의 토폴로지에 대해 비교한 결과, 다른 군집에 미치는 간섭이 큰 순서대로 동적으로 정렬하여 할당하는 휴리스틱 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보였으며, 채널이 다소 부족한 $K = 5$ 영역에서는 Exhaustive search 대비 1% 이내의 격차로 근접하였다. 반면 주파수 할당 정책이 적절하지 못한 경우 (Min Interf., Min $g_{\min}$) 채널 부족 영역에서 큰 폭의 성능 저하가 발생함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2025-02303435, No. RS-2026-25489627)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] S. Javed et al., "State-of-the-Art and future research challenges in UAV swarms," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 11, pp. 19023-19045, Jun. 2024.
- [2] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, 3rd Quart. 2019.
- [3] T. R. Beegum, M. Y. I. Idris, M. N. B. Ayub and H. A. Shehadeh, "Optimized routing of UAVs using bio-inspired algorithm in FANET: A systematic review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15588-15622, 2023.
- [4] M. T. Rahman, A. S. Shah, M. A. Karabulut, and H. Ilhan "FANET-enabled cluster-based emergency communication with 3D mobility in 5G and beyond," *Vehicular Communications*, vol. 56, 2025.