

# 基于 TopLeader 的异构群无人飞行器联盟成员选择方法

曹夕, 于会\*, 毛奎涛, 陈芦园

西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072

**摘要:** 任务协作是无人飞行器协同的一项重要内容, 而如何从中选择合适的成员以联盟的形式执行任务是一个复杂的决策问题。本文针对异构群无人飞行器联盟成员选择问题进行了研究, 提出了一种从特定种子节点出发的联盟成员选择算法 (TopLeader), 该方法通过提前筛选种子节点, 可在联盟构建时大幅降低成员选择的搜索范围, 提高算法执行效率。采用 Diameter、MST 和 Cardinality 三种性能评价指标在模拟网络中的试验结果表明, 该算法构建的任务协作联盟具有优异的质量和较低的运行时间, 可快速得到满足任务需求的异构群无人飞行器联盟结构。

**关键词:** 团队构建; 异构无人飞行器; 协作; 成员选择

中图分类号: V279+.2 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.07.059

随着无人飞行器 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 技术的发展, 具有体积小、质量轻、成本低、零伤亡、隐身性好、高机动等优势的小型无人飞行器开始广泛应用于复杂环境下的侦察打击、应急救援等任务<sup>[1-3]</sup>。由于单一、单类型的小型无人飞行器携带的资源有限, 只能用于执行某些特定的简单任务, 难以满足多功能复杂任务的需求。因此, 采用携带不同资源的异构无人飞行器以网络化<sup>[4]</sup>联盟的形式协同执行目标任务将是未来发展的必然趋势。

早期对无人飞行器任务协作的研究中, 主要针对大中型无人飞行器执行任务时的目标分配、路径规划以及它们之间的协同决策等问题展开研究, 大部分是基于坐标位置构建任务协作问题模型, 对执行任务后的完成率进行评价<sup>[5-7]</sup>, 没有考虑任务的成员选择和任务中的通信拓扑。随着无人飞行器的发展, 小型化、多架次异构无人飞行器以联盟形式执行任务越发受到人们的重视, 越来越多的研究者开始针对群无人飞行器的协同进行研究<sup>[8,9]</sup>, 研究内容包含了联盟执行任务时各成员的自主控制、成员间的网络通信等, 但仍很少

考虑执行任务联盟成员选择这一关键问题。

无人飞行器作为一种具备自主性的智能体, 其任务协作联盟构建的本质是选择合适的成员构建多智能体系统完成复杂的任务。在多智能体系统的研究中, 人们不断从生物进化和生物群体行为中得到启发, 提出许多用于解决实际复杂问题的新方法和新思路<sup>[10-13]</sup>。如在自然界中, 许多生物都是以群体为生活方式, 群体中的成员彼此联系, 相互协作, 以团队协作的形式完成复杂任务。在对协作团队构建的研究中, 有许多团队成员的选择方法, 如 RarestFirst<sup>[14]</sup> 和 BestLeader<sup>[15]</sup> 算法, 这些方法可为多智能体联盟成员的选择提供思路, 同样能适用于异构群无人飞行器任务协作联盟的成员选择。

本文针对异构群无人飞行器任务协作联盟的构建问题进行了定义, 对 RarestFirst 和 BestLeader 算法进行了分析和改进, 并根据无人飞行器速度快、携带装备有限、通信链路带宽较小等自身的特殊性, 提出了 TopLeader 联盟成员选择算法。与改进的 RarestFirst 和 BestLeader 算法相比, TopLeader 算法的效率有了极大的提升, 可以在

收稿日期: 2018-04-25; 退修日期: 2018-06-04; 录用日期: 2018-06-15

基金项目: 航空科学基金 (2016ZC53028)

\* 通信作者: Tel.: 13891827341 E-mail: huiyu@nwpu.edu.cn

引用格式: Cao Xi, Yu Hui, Mao Kuitao, et al. Cooperative team formation for multiple heterogeneous UAVs based on TopLeader algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (07): 59-68. 曹夕, 于会, 毛奎涛, 等. 基于 TopLeader 的异构群无人飞行器联盟成员选择方法 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (07): 59-68.

近似 RarestFirst 算法的较短计算时间内,得到通信成本与 BestLeader 算法近似的优异联盟结构,能有效应用于异构无人飞行器联盟成员的选择。

## 1 问题定义

假定  $C=\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  为无人飞行器的集合,集合  $C$  中的无人飞行器形成一个相互联系的通信网络分享信息,通信网络可简化表示为一个无向带权图  $G(V, E)$ ,图  $G$  中每个节点代表一架无人飞行器。如果两架无人飞行器能够进行直接通信,则其在图  $G$  中对应两个节点由一条边相连,边权重  $\text{weight}$  代表两个节点对应的两架无人飞行器间的通信效率,  $\text{weight} \in (0, 1)$ 。权重值越小表示两架无人机间的通信障碍越小,越适合组队执行任务。

假定  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  为  $C$  中所有无人飞行器携带的资源集合。对于每一架无人飞行器  $c_i$ ,  $Q(c_i)$  表示其携带的资源,  $Q(c_i) \subseteq S$ 。若  $s_j \in Q(c_i)$ ,则表示无人飞行器  $c_i$  携带了资源  $s_j$ 。对于每一种资源  $s_j$ ,携带该资源的无人飞行器集合表示为  $C(s_j)=\{c_i | s_j \in Q(c_i)\}$ 。任务  $T=\{(s_i, k_i) | 1 \leq i \leq p\}$  是一个集合,  $s_i \in S$ ,  $k_i$  表示资源  $s_i$  需求的数量,  $p$  表示完成任务  $T$  所需要的资源个数。

联盟构建问题可定义如下:给定无人飞行器集合  $C$ 、通信网络拓扑  $G(V, E)$  和任务  $T$ ,无人飞行器联盟成员选择问题转化为在图  $G$  中寻找子图  $C' \subseteq C$ ,使得该子图中每个节点所携带的资源能共同满足任务  $T$  的需求,同时具有较低的通信成本  $\text{cost}(C')$ ,即:

$$(1) \forall (s_i, k_i) \in T, s_i \subseteq \bigcup_{c_j \in C'} Q(c_j)$$

$$(2) \forall (s_i, k_i) \in T, k_i \leq |C(s_i)|$$

$$(3) \min(\text{cost}(C'))$$

在联盟成员的选择问题中,联盟中各成员间的通信成本根据考虑的角度可以进行不同的定义。如两架无人飞行器之间的通信成本可以用距离  $d$  衡量,  $d(c_i, c_j)$  表示无人飞行器  $c_i$  和  $c_j$  在  $G$  中的距离,该值代表图  $G$  中两个节点间最短路径的权值之和。无人飞行器  $c_i$  和无人飞行器集合  $C'$  的距离表示为  $d(c_i, C')$ ,  $d(c_i, C') = \{\min d(c_i, c_j), \forall c_j \in C'\}$ 。集合  $C'$  中到  $c_i$  具有最短距离的无人飞行器为  $N(c_i, C') = \{c_x | \forall c_j \in C', d(c_i, c_x) \leq d(c_i, c_j)\}$ 。两架无人飞行器  $c_i$  和  $c_j$  在图  $G$  中的最短路径表示为  $\text{Path}(c_i, C') = \{\text{Path}(c_i, c') | c' \in N(c_i, C')\}$ ,是最短路径上所有无人飞行器的集合。

## 2 算法

### 2.1 RarestFirst 算法

Lappas 等在解决团队构建问题时,提出了 RarestFirst 算法<sup>[14]</sup>,核心思想是首先找到任务需求中拥有最冷门技能的成员,并以此为出发点进行团队构建。此思路同样可应用于异构群无人飞行器任务协作联盟成员的选择。对于一项具体任务,优先满足其所需资源中稀缺资源的需求,是常用的解决方案,因此在选择联盟成员时,首先选择携带最稀缺资源的无人机加入联盟。

RarestFirst 算法在团队构建问题的求解中,认为一项任务中的一个技能仅需一位专家完成,没有考虑到一个任务中可能需要多个具有同样技能的专家成员的情况。而在异构群无人飞行器以联盟形式执行的任务中,一种任务资源可能需要不止一架无人机来提供。因此,为适应异构群无人飞行器任务协作联盟的构建需求,本文对 RarestFirst 算法进行了改进,以满足一次任务需要多架携带同种资源的无人机组建联盟的实际情况。

改进后的 RarestFirst 算法如算法 1 所述,算法优化的目标为联盟通信成本  $\text{Diameter}$ ,即联盟成员所构成子图的直径,对于联盟  $C'$ ,其联盟通信成本定义如下:

$$\text{Diameter}(C') = \max(d(c_i, c_j), \forall c_i, c_j \in C') \quad (1)$$

在算法 1 中,首先从任务所需资源中找到最稀缺的资源  $\text{srare}$  (line 1);然后依次从携带该资源的无人飞行器  $C$  ( $\text{srare}$ ) 中找到使算法定义的联盟通信成本最低的无人飞行器  $c^*$  (line 2~8),其中  $R_c$  记录了  $C(\text{srare})$  中每架无人飞行器所构建的联盟的通信成本  $\text{Diameter}$  (line 6);最后,算法将无人飞行器  $c^*$  作为联盟的第一个成员,然后根据任务所需资源及其数量,选择与  $c^*$  具有最短距离的无人飞行器加入联盟 (line 9~14),其中  $C(s) \setminus (c^*, C(s))$  表示从集合  $C(s)$  中去掉已经加入联盟的无人飞行器 (line 12)。

#### 算法 1 RarestFirst 算法

输入: 网络  $G$ , 任务  $T=\{(s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_p, k_p)\}$ , 携带资源  $s_i$  的无人飞行器集合  $C(s_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, p$ 。

输出: 联盟  $C'$

1.  $s_{\text{rare}} = \arg \min |C(s_i)|$
2. for every  $c \in C(s_{\text{rare}})$  do
3.   for  $(s, k) \in P$  and  $s \neq s_{\text{rare}}$  do
4.      $R_{cs} \leftarrow d(c, C(s))$
5.   end for
6.  $R_c \leftarrow \max R_{cs}$

```

7. end for
8.  $c^* \leftarrow \arg \min R_c$ 
9. for every  $(s, k) \in P$  do
10. while  $k > 0$  do
11.  $C' \leftarrow c^* \cup \{\text{Path}(c^*, C(s))\}$ 
12.  $C(s) \setminus W(c^*, C(s))$ 
13.  $k = k - 1$ 
14. end while
15. end for
return  $C'$ 

```

## 2.2 BestLeader 算法

Kargar 等认为在协作团队成员的选择中,难以做到成员之间的完全平等,一般有一个地位稍高的成员称为 leader,承担着团队中任务的监督和协调,而不一定在团队中贡献项目所需的专业技能,因此提出了 BestLeader 算法<sup>[15]</sup>。BestLeader 算法将网络中的每个成员作为团队的 leader 组建一个团队,从中选择出具有最小协作成本的团队作为算法的结果。这样的思路也可应用在异构群无人飞行器任务协作联盟成员的选择中,因为每架无人飞行器都是具备自主控制与协同交互能力的智能体,在以联盟形式执行任务的过程中,需要有无人飞行器发出级别较高的指令对联盟进行指挥。但 BestLeader 算法也不能解决一种资源需要多架无人飞行器携带的情况。算法 2 给出了适用于异构群无人飞行器任务协作联盟构建的 BestLeader 改进算法。算法优化的联盟通信成本为 LeaderDistance,对于联盟  $C'$ ,其定义如下:

$$\text{LeaderDistance}(C') = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{k_i} d(c_{s_i}^j, \text{leader}) \quad (2)$$

式中: $p$  为任务  $T$  所需的资源种类, $k_i$  为资源  $s_i$  需求的数量, $c_{s_i}^j$  为联盟  $C'$  中携带资源  $s_i$  的第  $j$  架无人飞行器,leader 指联盟  $C'$  中的领导成员, $d(c_{s_i}^j, \text{leader})$  指无人飞行器  $c_{s_i}^j$  与联盟 leader 之间的距离,即通信成本,如果联盟中的 leader 携带了任务所需资源,即 leader 与某一  $c_{s_i}^j$  为同一架无人飞行器,此时  $d(c_{s_i}^j, \text{leader}) = 0$ 。

在算法 2 中,首先依次从网络  $G$  中选择一架无人飞行器作为联盟的 leader (line 2),即构成联盟的第一个成员;然后根据任务所需的资源及其数量,选择与 leader 具有最短距离的无人飞行器加入联盟,并计算其联盟通信成本 LeaderDistance (line 4~13),对于需求量为  $k$  的资源  $s$ ,算法从携带资源  $s$  的无人飞行器集合  $C(s)$  中选择距离 leader 最短的  $k$  架无人飞行器加入联盟 (line 5~12);通过比较各

个联盟的通信成本 LeaderDistance,最后将该值最小的联盟作为算法的输出结果。

## 2.3 TopLeader 算法

RarestFirst 算法首先找到任务中最奇缺的资源,然后将携带该资源的无人飞行器作为联盟构建的起点。由于携带最奇缺资源的无人飞行器数量必定较少,因此算法搜索空间也较小。BestLeader 算法需要遍历网络中的所有无人飞行器,将它们作为联盟构建的起点各自组建一个联盟,再从中选择出通信成本最低的联盟,这种更大的搜索范围有助于寻找到通信成本更低的联盟,但同时大幅增加了算法的运行时间。由于无人飞行器具有飞行速度快、携带装备有限、通信链路带宽较小等自身的特殊性,BestLeader 算法难以满足实际应用的需求。

上述两种方法组建联盟的过程均可归纳为三个步骤:(1)从网络中确定联盟构建时的第一个成员集合,即联盟构建种子节点的选择范围;(2)依次从其中的一个种子节点出发,根据任务需要选择与种子节点通信成本较低的成员加入联盟;(3)比较各联盟的整体通信成本,选出最优的联盟结构作为算法的输出结果。RarestFirst 算法根据资源的稀缺性确定种子节点的范围,BestLeader 将网络中的所有节点都看作种子节点。两种方法都没有对网络的拓扑结构进行分析,而蕴含在拓扑结构中的信息能够优化种子节点的选择,减少联盟构建求解过程中的搜索时间。

### 算法 2 BestLeader 算法

输入:网络  $G$ , 任务  $T = \{(s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_p, k_p)\}$ , 携带资源  $s_i$  的无人机集合  $C(s_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ 。

输出:团队  $C'$

```

1.  $C' \leftarrow \emptyset$ , leastLeaderDistance  $\leftarrow +\infty$ 
2. for every leader  $\in G$  do
3. leaderDistance  $\leftarrow 0$ , team  $\leftarrow \{\text{leader}\}$ 
4. for every  $(s, k) \in P$  do
5. while  $k > 0$  do
6. distance  $\leftarrow d(\text{leader}, C(s))$ 
7. selectmember  $\leftarrow N(\text{leader}, C(s))$ 
8.  $C(s) \setminus \text{selectmember}$ 
9. team  $\leftarrow \text{team} \cup \text{Path}(\text{leader}, \text{selectmember})$ 
10. leaderDistance  $\leftarrow \text{leaderDistance} + \text{distance}$ 
11.  $k = k - 1$ 
12. end while
13. end for

```

```

14. if leaderDistance < leastLeaderDistance then
15.   C' ← team;
16.   leastLeaderDistance ← leaderDistance;
17. end if
18. end for
return C'

```

图1给出了一个由 $c_1 \sim c_7$ 架无人飞行器构成的通信网络示例。其中, $c_4$ 处于网络中心,与其他6架无人飞行器均能进行有效的通信,在网络中对信息流动具有更好的视野,如果将 $c_4$ 作为种子节点构建联盟,在联盟后续成员的选择时能从大量与之连接的无人飞行器中进行搜索,因此可能得到通信成本更低的联盟。而RarestFirst算法根据资源稀缺性选择的种子节点,可能在网络中只拥有少量的连接,从而影响联盟的质量。BestLeader算法为了避免这样的情况,采用遍历网络中所有节点的做法,将每架无人飞行器都作为种子节点进行联盟构建,再择优输出,但也因此增加了计算的负担。总之,这两种方法都没有对通信网络的拓扑结构信息加以利用。

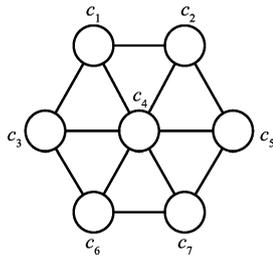


图1 由7架无人飞行器组成的示例网络

Fig.1 An example network consisted by seven unmanned aerial vehicles

无人飞行器之间进行通信时,由于位置、环境以及自身带宽的限制,通信效率具有较大的差别,很多无人飞行器之间难以进行直接通信,需要其他无人飞行器进行信息的转递,也就是承担中继节点的功能<sup>[9]</sup>。在无人飞行器形成的通信网络 $G$ 中,这些承担信息转递任务的少量无人飞行器,有效降低了其他无人飞行器之间的通信成本,选择它们作为联盟构建的种子节点,有助于搜索到质量更好的联盟,又能避免时间开销的大幅增加。因此,本文提出基于特定种子节点的TopLeader算法,利用通信网络的结构信息缩小种子节点的选择范围。

在异构群无人飞行器任务协作联盟成员的选择中,TopLeader算法选择网络中重要程度较高的top- $k$ 无人飞行器作为种子节点集合 $K$ ,然后进行联盟的构建。算法3展示了TopLeader算法的流程,算法优化的联盟通信成本为

LeaderDistance,对于联盟 $C'$ ,其定义如式(2)所示。

在算法3中,TopLeader算法需要输入提前得到的种子节点集合 $K$ ,然后从该集合中依次选择一架无人飞行器作为联盟的leader(line 2),接下来的步骤与BestLeader算法类似,最后通过比较种子节点集合 $K$ 中各架无人飞行器组建的联盟,将通信成本LeaderDistance值最小的联盟作为算法的输出结果。

### 算法3 TopLeader算法

输入:网络 $G$ ,种子节点集合 $K$ ,任务 $T=\{(s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_p, k_p)\}$ ,携带资源 $s_i$ 的无人机集合 $C(s_i), i=1, 2, \dots, p$ 。

输出:团队 $C'$

```

1. C' ← ∅, leastLeaderDistance ← + ∞
2. for every leader ∈ K do
3.   leaderDistance ← 0, team ← {leader}
4.   for every (s, k) ∈ P do
5.     while k>0 do
6.       distance ← d ( leader, C (s) )
7.       selectmember ← N ( leader, C (s) )
8.       C (s) \selectmember
9.       team ← team ∪ Path (leader, selectmember)
10.      leaderDistance ← leaderDistance + distance
11.      k = k-1
12.    end while
13.  end for
14.  if leaderDistance < leastLeaderDistance then
15.    C' ← team;
16.    leastLeaderDistance ← leaderDistance;
17.  end if
18. end for
return C'

```

TopLeader算法中在选择种子节点集合 $K$ 时,采用了已有的研究成果ISH(Improved Structural Holes)算法<sup>[16]</sup>,该算法综合考虑了节点的直接邻居和间接邻居的数量,能够准确反映无人飞行器在通信网络中的重要程度。

## 3 试验

### 3.1 试验数据集

研究表明,大多数真实网络具有与规则网络和随机网络截然不同的统计特征,其中最主要的是Barabasi提出的无标度特性<sup>[17]</sup>与Watts提出的小世界特征<sup>[18]</sup>。因此,本文采

用了BA无标度模型<sup>[17]</sup>和SW小世界模型<sup>[18]</sup>生成网络,用以模拟异构无人飞行器网络构建的实际情况。试验中,无标度网络生成参数为(500, 5),其中500代表节点个数,5代表从新节点连接到现有节点的边数,边的个数为 $|E|=2475$ ;小世界网络生成参数为(500, 6, 0.5),其中500代表节点个数,6代表生成环形拓扑结构后,每个节点要与之最相邻的6个节点连接,0.5表示对上述操作完成后的生成的每条边再以0.5的概率生成一条与其他节点相连的边,试验使用的小世界网络边数 $|E|=2283$ 。网络中的边权重 $\text{weight} \in (0, 1)$ ,是随机生成的服从正态分布 $N(0.5, 0.04)$ 的数值。网络中每架无人飞行器随机选择一种或多种资源携带,所有无人飞行器携带的资源种类共 $|S|=50$ 种。

### 3.2 试验设置

试验中任务 $T=\{(s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_p, k_p)\}$ 按如下规则生成: $|T| \in \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ ,对于每一个值,构造1000个任务,每个任务中需求的资源 $s_i$ 在资源集合 $|S|$ 中随机选取,资源 $s_i$ 的需求量 $k_i$ 随机生成,最小为1,最大为携带资源 $s_i$ 的无人飞行器数量 $|C(s_i)|$ 的1/4。各算法使用完全相同的任务进行试验,最后的结果为1000个任务的平均值。

TopLeader算法在与RarestFirst和BestLeader算法的对比试验中,分别选择了ISH算法得到的节点重要性排序中top 1%和top 2%节点,以研究种子节点集合 $K$ 的大小对联盟构建质量的影响。

### 3.3 评价方法

在对比试验中,采用三种常用的评价指标Diameter、最小生成树(Minimum Spanning Tree, MST)和Cardinality对不同方法构建联盟的质量进行比较。三种指标的定义如下:

(1) Diameter: 团队成员所构成子图的直径。团队中任意两个成员之间最短路径的最大值,Diameter越小说明团队结构越紧密,团队质量越好。对于团队 $C'$ , $\text{Diameter}(C') = \max(d(c_i, c_j)), c_i, c_j \in C'$ 。

(2) MST: 团队结构子图的最小权重生成树各边权重之和。团队的最小权重生成树是团队的最小连通子图,包含了所有团队成员与团队中最少的连边,并使各边的权重之和最小。当团队的所有成员都需要沟通时,最小权重生成树各边权重之和,反映了最小的沟通成本。假定 $T$ 为团队 $C'$ 的最小权重生成树, $T$ 中节点 $u, v$ 之间边的权重为 $\omega(u, v)$ ,则 $\text{MST}(C') = \sum_{u, v \in T} \omega(u, v)$ 。

(3) Cardinality: 联盟的大小。一般情况下认为联盟成员越少,联盟的沟通成本越小。对于团队 $C'$ , Cardinality

$(C') = |C'|$ 。

### 3.4 试验结果

图2和图3分别展示了在无标度网络和小世界网络的试验中,本文提出的TopLeader算法与RarestLeader和BestLeader算法构建任务协作联盟的有效性。从图2中可以看出,无标度网络中,RarestLeader算法在三种评价方法中的结果最差,而BestLeader和本文提出的TopLeader算法结果较为接近;而在图3的小世界网络中,本文提出的TopLeader算法和BestLeader算法相比,结果稍差,但随着任务资源数的逐步增大,两个方法结果相当。

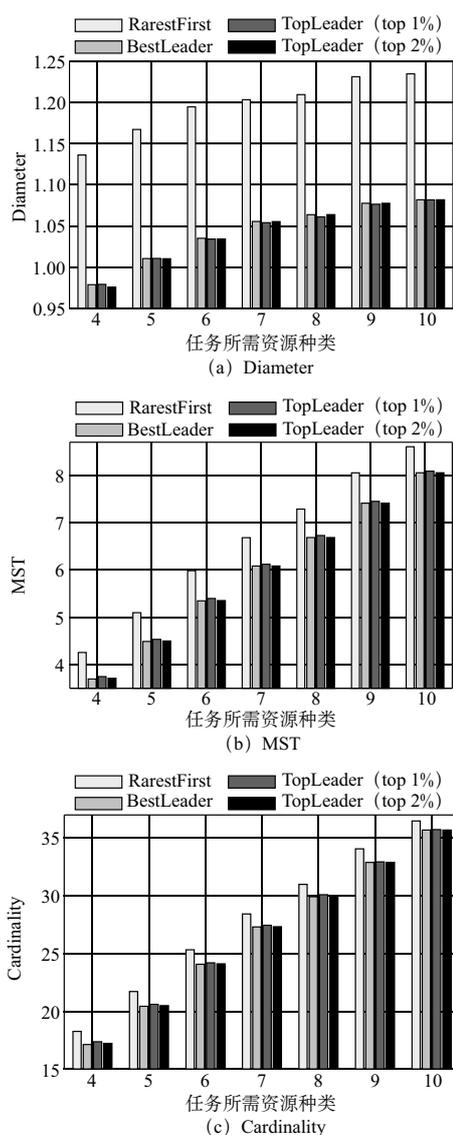


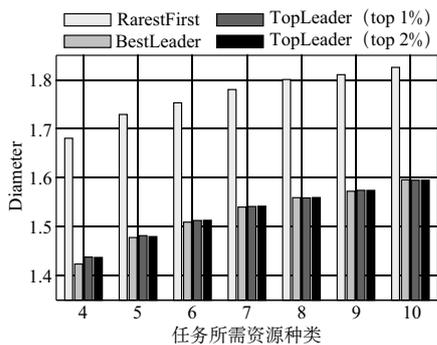
图2 无标度网络中,各算法在三种评价指标下完成1000个任务的平均结果

Fig.2 The results of three performance measures averaged by 1000 tasks in scale-free network

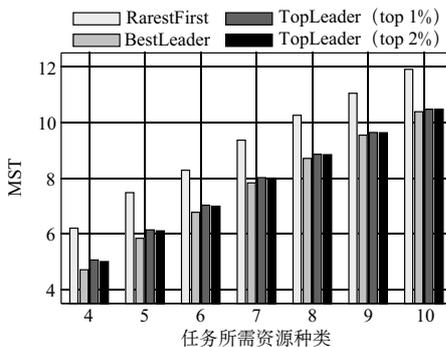
在图 2 (a) 无标度网络的试验中, TopLeader 算法的 Diameter 指标结果比 BestLeader 还要稍好一些, 特别是任务资源种类较少的时候; 但在图 3 (a) 小世界网络的试验中则是一直不如 BestLeader 算法, 不过随着任务资源种类的增加, 两种算法的结果逐渐接近。在 MST 指标和 Cardinality 指标中, RarestLeader 算法的结果在两个网络中都是最差的, 而 BestLeader 算法的结果均为最好。本文提出的 TopLeader 算法, 种子节点集合  $K$  越大, 算法的结果越好。如果选择 ISH 算法得到的节点重要性排序中 top 2% 的节点作为种子节点, 在无标度网络中算法的结果已经与 BestLeader 算法接近; 在小世界网络则仍差一些, 但随

着任务资源种类的增加, 与 BestLeader 算法的差距逐渐缩小。总的来说, 本文提出的 TopLeader 算法在选择适量的 top- $k$  节点作为种子节点时, 联盟构建质量在无标度网络中与 BestLeader 算法相当, 在小世界网络中稍差, 但都远好于 RarestLeader 算法。

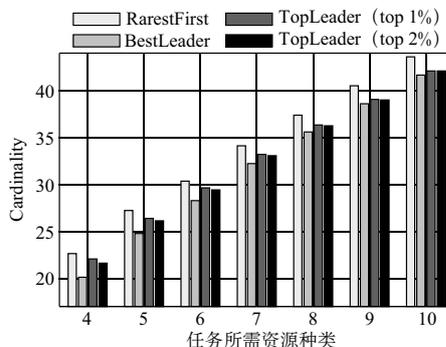
图 4 和 5 给出了在两个网络的试验中各算法的运行时间对比。从图中可以看出, BestLeader 算法的运行时间远高于其他算法, 而 RarestLeader 算法的运行时间最低, TopLeader 算法的运行时间随着种子节点集合  $K$  的增加而成比例增加, 但按照试验设置的无人飞行器总数的 1% 和 2%, 运行时间与 RarestLeader 算法属于同一数量级。



(a) Diameter



(b) MST



(c) Cardinality

图 3 小世界网络中, 各算法在三种评价指标下完成 1000 个任务的平均结果

Fig.3 Results of three performance measures averaged by 1000 tasks in small-world network

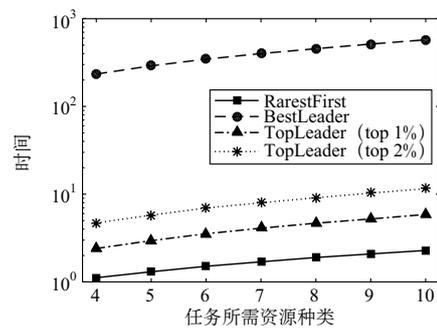


图 4 无标度网络中算法运行时间

Fig.4 Algorithms runtime in scale-free network

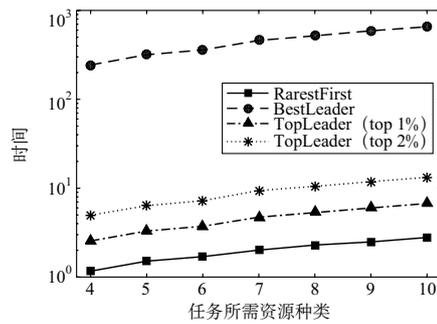


图 5 小世界网络中算法运行时间

Fig.5 Algorithms runtime in small-world network

综上所述, 在本文的试验设置条件下, TopLeader 算法在求解联盟构建问题时, 可以在近似 RarestFirst 算法的较短运行时间内, 得到近似 BestLeader 算法的优异联盟构建结果。TopLeader 算法的高效使其能有效应用于异构无人飞行器联盟成员的构建。

### 4 结论

本文对异构群无人飞行器任务协作联盟的成员选择问题进行了研究, 将协作团队成员选择算法 RarestFirst 和 BestLeader 在该问题中进行了应用, 并提出了一种基于

TopLeader 联盟成员选择算法。该算法首先找到网络中的重要节点,然后将这些节点作为团队种子成员进行联盟构建,大幅降低联盟构建时的搜索范围。在两种不同网络的对比试验中表明,TopLeader 算法构建联盟的质量明显优于 RarestFirst 算法,在任务资源种类较多时和 BestLeader 算法相当,能得到高质量的联盟结构。但是,TopLeader 算法的运行时间远低于 BestLeader 算法,仅比 RarestFirst 算法稍高,能以较低的计算时间得到质量优异的联盟结构,可以满足异构群无人飞行器任务协作联盟构建的实际应用需求,为解决多智能体联盟成员选择方法提供了一条可行的思路。 **AST**

### 参考文献

- [1] Liu Z, Gao X G, Fu X W. Coalition formation for multiple heterogeneous UAVs cooperative search and prosecute with communication constraints[C]// Control and Decision Conference. IEEE, 2016: 1727-1734.
- [2] Sujit P B, George J M, Beard R W. Multiple UAV coalition formation[C]// American Control Conference. IEEE, 2008: 2010-2015.
- [3] Bardhan R, Bera T, Sundaram S. A decentralized game theoretic approach for team formation and task assignment by autonomous unmanned aerial vehicles[C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2017: 432-437.
- [4] Mclain T W, Chandler P R, Rasmussen S, et al. Cooperative control of UAV rendezvous[C]// American Control Conference, 2001 Proceedings of the IEEE, 2001.
- [5] 周昊,覃征,邢剑宽. 基于多 Agent 的多无人机协同决策算法仿真平台设计 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24 (3): 53-60.  
Zhou Hao, Qin Zheng, Xing Jiankuan. Simulation platform of cooperative algorithm for UAVs based on Agent[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24 (3): 53-60. (in Chinese)
- [6] 庞海龙,刘健,王文豪. 一种异构多无人机多目标任务分配方法 [C]// 中国指挥控制大会, 2016.  
Pang Hailong, Liu Jian, Wang Wenhao. Research on mission assignment of MAV and Multi-Type UAV[C]// China Conference on Command and Control, 2016. (in Chinese)
- [7] 宋敏,魏瑞轩,冯志明. 基于差分进化算法的异构多无人机任务分配 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (7): 1706-1710.  
Song Min, Wei Ruixuan, Feng Zhiming. Cooperative task assignment for heterogeneous multi-UAVs based on differential evolution algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22 (7): 1706-1710. (in Chinese)
- [8] 周绍磊,康宇航,万兵,等. 多无人机协同编队控制的研究现状与发展前景 [J]. 飞航导弹, 2016 (1): 78-83.  
Zhou Shaolei, Kang Yuhang, Wan Bing, et al. Research status and development prospect of multi UAV cooperative formation control[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016 (1): 78-83. (in Chinese)
- [9] 王东,张广政,穆武第. 多无人机协同作战通信自组网技术 [J]. 飞航导弹, 2012 (1): 59-63.  
Wang Dong, Zhang Guangzheng, Mu Wudi. Self-networking technology of multi-UAV cooperative warfare communication[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012 (1): 59-63. (in Chinese)
- [10] 刘佳,陈增强,刘忠信. 多智能体系统及其协同控制研究进展 [J]. 智能系统学报, 2010, 5 (1): 1-9.  
Liu Jia, Chen Zengqiang, Liu Zhongxin. Advances in multi-agent systems and cooperative control[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2010, 5 (1): 1-9. (in Chinese)
- [11] 苏菲,陈岩,沈林成. 基于蚁群算法的无人机协同多任务分配 [J]. 航空学报, 2008 (b05): 184-191.  
Su Fei, Chen Yan, Shen Lincheng. UAV cooperative multi-task assignment based on ant colony algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008 (b05): 184-191. (in Chinese)
- [12] 陈冬,周德云,冯琦. 基于粒子群优化算法的无人机航迹规划 [J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27 (4): 340-342.  
Chen Dong, Zhou Deyun, Feng Qi. Route planning for unmanned aerial vehicles based on particle swarm optimization[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27 (4): 340-342. (in Chinese)
- [13] 孙小雷,齐乃明,董程,等. 无人机任务分配与航迹规划协同控制方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37 (12): 2772-2776.  
Sun Xiaolei, Qi Naiming, Dong Cheng, et al. Cooperative control algorithm of task assignment and path planning for multiple UAVs[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37 (12): 2772-2776. (in Chinese)
- [14] Lapps T, Liu K, Terzi E. Finding a team of experts in social networks[C]// ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Paris, France, 2009: 467-476.
- [15] Kargar M, An A. Discovering top-k teams of experts with/without a leader in social networks[C]// Proceedings of the 20th

- ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2011: 985-994.
- [16] Yu Hui, Cao Xi, Liu Zun, et al. Identifying key nodes based on improved structural holes in complex networks[J]. Physica A Statistical Mechanics & its Applications, 2017, 486 (5): 318-327.
- [17] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286 (5439): 509-512.
- [18] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393 (6684): 440-442.
- 智能决策支持。  
E-mail: 1105824588@qq.com
- 于会 (1972- ) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 复杂网络、智能决策支持。  
Tel: 13891827341
- E-mail: huiyu@nwpu.edu.cn
- 毛奎涛 (1993- ) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 复杂网络、链接预测。  
E-mail: 284652735@qq.com
- 陈芦园 (1995- ) 女, 硕士研究生。主要研究方向: 智能决策支持。  
E-mail: 1642471698@qq.com
- 作者简介**  
曹夕 (1992- ) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 复杂网络、

## Cooperative Team Formation for Multiple Heterogeneous UAVs Based on TopLeader Algorithm

Cao Xi, Yu Hui\*, Mao Kuitao, Chen Luyuan

*School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

**Abstract:** Multiple unmanned aerial vehicles collaborating to complete a given task is one of important issues in the research field of multi-agent collaboration, and how to select the team members to generate a suitable team is a complex decision problem. In this paper, a cooperative team formation for multiple heterogeneous UAVs based on TopLeader algorithm was proposed. By selecting the seed nodes in advance, TopLeader method can greatly reduce the search range of the members selection and improve the efficiency of the algorithm execution. To verify the effectiveness of proposed method, performance measures Diameter, MST and Cardinality were used in this paper. Experimental results on artificial network suggest that the TopLeader method can effectively find a UAVs' cooperative alliance from seed nodes and has excellent quality and low running time. It's suitable to be applied in complicate environments for team formation of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles.

**Key Words:** team formation; heterogeneous unmanned aerial vehicle; cooperation; members selection

Received: 2018-04-25; Revised: 2018-06-04; Accepted: 2018-06-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China ( 2016ZC53028)

\*Corresponding author. Tel.: 13891827341 E-mail: huiyu@nwpu.edu.cn