

基于路径规划的无人机加权高效分簇方法

严磊¹, 雷磊¹, 蔡圣所¹, 路志勇²

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 210016; 2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 分簇是延长无人机编队网络生存时间、增强网络抗毁性和可扩展性的重要手段。结合无人机路径规划策略, 提出 2 种无人机编队网络加权高效分簇方法, 即基于路径规划的簇首加权选举算法 (WHEA-P) 和基于路径规划的簇成员加权调整算法 (WCAA-P)。2 种算法充分考虑了在路径规划条件下无人机编队网络拓扑变化对分簇结构的影响, 分别在簇首选举阶段和簇成员调整阶段实现了无人机编队网络分簇的动态调整。仿真实验结果表明, 2 种算法均能有效地实现网络负载均衡, 降低节点能耗, 延长网络生存时间, 性能明显优于典型的最小 ID 号分簇算法和加权分簇算法。

关键词: 无人机分簇; 路径规划; 簇首选举; 簇成员调整; 网络生存周期; 负载均衡

中文引用格式: 严磊, 雷磊, 蔡圣所, 等. 基于路径规划的无人机加权高效分簇方法 [J]. 计算机工程, 2018, 44(11): 276-281.

英文引用格式: YAN Lei, LEI Lei, CAI Shengsuo, et al. UAV weighted efficient clustering method based on path-planning [J]. Computer Engineering, 2017, 44(11): 276-281.

UAV Weighted Efficient Clustering Method Based on Path-planning

YAN Lei¹, LEI Lei¹, CAI Shengsuo¹, LU Zhiyong²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

[Abstract] UAV clustering is an important means to prolong network lifetime and enhance the survivability and the scalability of the network. Based on path-planning, two weighted efficient clustering algorithms for UAV network are proposed, which are Weighted Head Election Algorithm based on Path-planning (WHEA-P) and Weighted Cluster Adjustment Algorithm based on Path-planning (WCAA-P). These two algorithms take full account of the influence of network topology change on cluster structure with the help of UAV path-planning, and dynamically adjust the cluster of networks in the cluster head election phase and the cluster member adjustment phase respectively. The results show that two proposed algorithms perform better than the least ID algorithm and the weighted clustering algorithm, and can effectively balance the load of nodes. Thus it reduces energy consumption of the nodes and prolongs network lifetime.

[Key words] UAV clustering; path-planning; cluster head election; cluster member adjustment; network lifetime; load balancing

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0048128

0 概述

无人机编队网络不依赖任何固定的基础设施, 由具有无线收发功能的无人机节点组成。为了提高编队网络的可扩展性, 无人机编队网络普遍采用分级式的网络结构, 即对网络实施分簇管理^[1]。

均衡网络中无人机节点的负载和能耗, 延长网络的最大生存周期是无人机分簇算法的一个重要实现目标。在网络中, 簇首负责簇内成员之间的通信和簇内成员与其他簇成员之间的通信服务, 因此, 实

现分簇算法的关键在于选择合理的无人机节点担任簇首^[2]。

文献[3]提出的最小 ID 号算法通过节点的 ID 号对网络进行分簇。在分簇过程中, 选取相邻节点中 ID 号最小的节点担任簇首, 簇首的一跳范围内还未加入其他簇的邻居节点加入该簇; 在剩余未确定身份的节点中, 重复以上步骤, 直至每个无人机节点获得自己的身份。虽然该算法具有实现方便, 计算量小等优点, 但是由于较小 ID 号的节点频繁地被最小 ID 号算法选择担当簇首, 而簇首需要负责簇内成

基金项目: 国家自然科学基金 (61572254); 江苏省自然科学基金 (BK20161488); 航空科学基金 (2016ZC52029)。

作者简介: 严磊 (1993—), 男, 硕士研究生, 主研方向为航空自组织网络; 雷磊, 教授; 蔡圣所, 实验师; 路志勇, 研究员。

收稿日期: 2017-07-27 **修回日期:** 2017-10-13 **E-mail:** pulci1993619@126.com

员以及簇间成员通信任务,因此电池能耗远大于簇成员。可能会因为簇首的电量迅速耗尽,导致网络的生命周期^[4]被严重的缩短。

文献[5]提出的加权分簇算法(WCA)。在最小ID号算法的基础上,综合考虑了节点的相对移动性、理想节点度^[6]及电池电量^[7]等因素,对每一种影响因素分别赋予不同的权重比例,从而生成最终的权重,以此评价节点担任簇首的能力。在该算法中,优先选择相对移动性低,剩余电量较多且节点度合理的节点担任簇首,实现节点间的负载均衡,延长了网络的生命周期。

最小ID号算法和WCA虽然在一定程度上延长了网络的生命周期,但是它们都没有充分考虑到网络中无人机编队的拓扑变化对分簇结构的影响。在现有的无人机分簇算法中,无人机普遍采用自由运动模型实现无人机的飞行运动,而这并不符合无人机飞行的实际情况。事实上,由于无人机飞行一般都携带任务,它们的航线轨迹都是被提前规划好的。所以在无人机的高效分簇算法的设计中,为了实现网络的负载均衡^[8],达到延长网络的生命周期的目的,还必须同时考虑无人机编队拓扑变化带来的影响^[9]。

本文通过无人机路径规划算法实现对无人机编队飞行线路的设计,同时充分考虑在路径规划条件下无人机编队网络拓扑变化对分簇结构的影响。在此基础上,提出基于路径规划的簇首加权选举算法(Weighted Head Election Algorithm based on Path-planning, WHEA-P)和基于路径规划的簇成员加权调整算法(Weighted Hluster Adjustment Algorithm based on Path-planning, WCAA-P)。

1 基于路径规划的无人机网络加权高效分簇

针对现有的无人机分簇算法没有充分考虑路径规划条件下,无人编队网络拓扑变化对分簇结构的影响带来的弊端,本文在基于粒子群算法(POS)的无人机路径规划的基础上,实现了2种基于路径规划的无人机网络加权高效分簇方法(WHEA-P和WCAA-P)。

1.1 基于POS的无人机路径规划

POS^[10]是一种受到飞鸟集群活动规律启发而提出的进化算法,已广泛应用于无人机网络部署^[11]。本文采用文献[12]提出的POS实现了无人机在多障碍物的环境下的路径规划。POS相比遗传算法而言,没有变异和交叉运算,仅仅借助于粒子的速度完成搜索,因此具有搜索速度快、实现简单等优点。此外它还拥有记忆性,记忆粒子群体的历史最好位置并且将它传递给其他粒子,优化粒子的迭代结果,提高粒子的适应度。在该算法中,首先在无人机初始位置放置一群随机粒子,然后通过计算每个粒子的

适应度^[13]进行迭代,直至找到最终目标。在生成的所有粒子路径轨迹中,找到一条远离威胁区且距离最短的路线,即为无人机的最佳飞行线路。图1给出了在20 km × 20 km的仿真监控区域中3架无人机的路径规划,其中小圆圈代表无人机的起点,x代表无人机的终点,大圆圈代表威胁区。

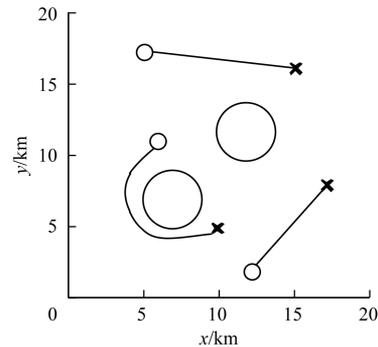


图1 在20 km × 20 km的仿真监控区域中3架无人机的路径规划

1.2 WHEA-P原理

WHEA-P在簇首选举阶段考虑了相对移动速率这一指标的弊端,用稳定度 S 替代相对移动速率,作为分簇的重要权重指标进行考虑。稳定度 S 反映了每个竞选簇首的节点拥有的稳定的邻居节点的个数。稳定的邻居节点是竞选簇首的节点的邻居节点,并且在分簇周期内到竞选簇首的节点的距离始终小于最大传输距离。竞选簇首的节点拥有的稳定的邻居节点的数目越多,则它的稳定度越高,当选簇首的概率也就越大。此外,选举节点担任簇首还需要考虑节点的剩余能量 P 和节点的节点度 d 。簇成员的能耗要远低于簇首的能耗,因此应当优先选择电量充足的节点担任簇首。簇首节点拥有的成员节点的数量超出所能承受的阈值,会带来网络性能下降和簇首节点能耗的大幅提高等弊端,严重情况下会导致网络的瘫痪。因此,在簇首选举时,节点的理想节点度 D 和节点度 d 的差值也是一个重要的影响因素。

1.2.1 相对移动速率的弊端

在WCA中,无人机的相对移动速率是评判无人机能否成为簇首的一个重要指标。文献[14]提出可以根据计算各节点的平均运动速度计算节点的相对移动性。假设节点 u 的邻居节点集合为 N_u ,节点 u 相对邻居节点 v 的速度为 $V(u-v)$,则节点 u 相对于所有邻居节点的平均运动速度定义为:

$$V_u = \frac{\sum_{v \in N_u} V(u-v)}{|N_u|} \quad (1)$$

节点的相对移动速率越小,担任簇首的概率越大。但在实际情况下,无人机相对移动速率这一指标很难客观准确地评定无人机之间的相对移动性。 $[t, t + \Delta t]$ 时刻簇内无人机运动情况如图2所示。

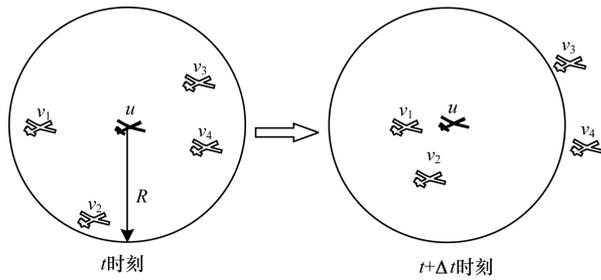


图2 $[t, t + \Delta t]$ 时刻簇内无人机的运动情况

由图2观察可以看出,邻居节点 v_1 、 v_2 朝向簇首 u 运动,邻居节点 v_3 、 v_4 远离簇首 u 运动。虽然根据式(1)计算得出的在 $t + \Delta t$ 时刻无人机的相对移动速率减小,但是由于邻居节点 v_3 、 v_4 到簇首 u 的距离超过最大传输距离 R ,导致簇首 u 的簇成员反而减少,因此簇首 u 不适合继续担任簇首。

1.2.2 稳定度计算

在 $[t, t + \Delta t]$ 分簇周期内,在选举 t 时刻的簇首时,需要计算 t 时刻每个竞选簇首的节点 i 的稳定度 $S_i(t)$ 。借助路径规划获取的无人机飞行路线,可以计算 $[t, t + \Delta t]$ 分簇周期内 t 时刻节点 i 的稳定度 $S_i(t)$ 。 $N_{nbr,i}(t)$ 是 t 时刻竞选簇首的节点 i 的邻居节点的集合, $S_i(t)$ 初始化为 $N_{nbr,i}(t)$ 集合中邻居节点的数目。在 $[t, t + \Delta t]$ 分簇周期内,选取 n 个均匀离散的时间点,在每个离散的时间点分别计算 $N_{nbr,i}(t)$ 集合中的每个邻居节点到竞选簇首节点 i 的距离,如果它们的距离超过传输距离 R ,那么就将当前邻居节点从 $N_{nbr,i}(t)$ 集合中移除,同时 $S_i(t)$ 做减1处理。最终就可以求得 t 时刻节点 i 的稳定度 $S_i(t)$ 。计算稳定度的伪代码如下所示。

算法1 t 时刻节点 i 的稳定度 $S_i(t)$

$S_i(t)$: Stability of node i at t moment

$N_{nbr,i}(t)$: Set of nodes at range of cluster head's transmission distance R at t moment

BEGIN

1. initial $S_i(t)$ which equals the number of neighbor nodes in $N_{nbr,i}(t)$

2. initial $t_{temp} \leftarrow t, r \leftarrow 0$

3. while $t_{temp} < t + \Delta t$

4. for each neighbor node j in $N_{nbr,i}(t)$

5. if distance between neighbor node j and node i > transmission distance R then

6. $S_i(t) \leftarrow S_i(t) - 1$

7. remove neighbor node j from $N_{nbr,i}(t)$

8. end if

9. end

10. $r \leftarrow r + 1$

11. $t_{temp} \leftarrow t + r * \Delta t / n$

12. end while

1.2.3 WHEA-P 具体步骤

WHEA-P 步骤如下:

步骤1 开始阶段,依次给每个无人机节点按照从小到大分配 ID 号,然后利用最小 ID 号算法对无人机网络进行初始分簇。

步骤2 每个簇首选举周期,各节点根据其剩余电量、稳定度及节点度计算权值 W :

$$W = w_p P + w_s S + w_d |d - D| \quad (2)$$

其中, w_p 、 w_s 、 w_d 为权值系数,权值大小可以根据实际情况进行设定,但是必须满足 $w_p + w_s + w_d = 1$, d 为邻居一跳范围内无人机节点的个数, D 为理想节点度,可以考虑无人机的架数除以仿真范围内簇的数目求得,当然也可以根据实际情况动态调整, S 为无人机节点的稳定度, P 为无人机节点的剩余能量。

步骤3 簇首获取簇内簇成员的权值 W 。

步骤4 簇首将接收到的权值按照从大到小的顺序进行排序,然后重新向簇内成员分配 ID 号。分配原则如下:拥有最大权值 W 的节点获得最小 ID 号,拥有最小权值 W 的节点获得最大 ID 号。若存在拥有相同 W 值的 2 个节点,则簇首随机选择一个节点,使它获得较小的 ID 号。

步骤5 簇首向其成员节点发送新的 ID 号。

步骤6 成员节点用新的 ID 号替换旧的 ID 号,然后调用最小 ID 号算法进行重新分簇。

1.3 WCAA-P 原理

WCAA-P 分为簇首选举和簇成员调整 2 个阶段,其中簇成员调整阶段是 WCAA-P 的主要创新之处。簇首选举阶段通过 WCA 确定簇首;簇成员调整阶段每个簇成员节点借助无人机路径规划生成的飞行线路,分别考虑与每个簇首的飞行线路的接近程度和该簇首的簇内成员个数。计算簇成员到每个簇首的飞行线路的接近程度,可以通过在簇成员飞行线路上选取 n 个有代表性的离散点,再计算出簇成员到簇首的平均欧拉距离,用来反映飞行线路的接近程度。此外为了避免簇内成员过多导致负载不均衡,还须要考虑簇成员选择加入的簇,它的簇内成员个数与理想节点度 D 的差值的情况。最终求出权值,综合考虑后选择最合适的簇首,加入该簇。每个簇成员依次重复上面的过程,计算出到每个簇首的权值,然后选择最合适的簇首,加入该簇。该算法确保每个簇成员都能选择合适的簇首,并且保证每个簇首拥有合理的簇成员数。

1.3.1 WCAA-P 具体步骤

WCAA-P 步骤如下:

步骤1 开始阶段,依次给每个无人机节点按照从小到大分配 ID 号,然后利用最小 ID 号算法对无人机网络进行初始分簇。

步骤2 每个簇首选举周期,各节点根据 WCA

计算出的权值 W 进行分簇,确定簇首。

步骤 3 借助路径规划获得的无人机编队的拓扑结构和飞行线路,计算每个簇成员到每个簇首节点 i 平均欧拉距离 L_i 和对应簇首 i 的节点度 d_i 。

例如,在 t 时刻进行分簇,执行完步骤 2 确定簇首后,在 $[t, t + \Delta t]$ 分簇周期内选取 n 个均匀的离散时间点并且根据路径规划中 $[t, t + \Delta t]$ 时间内的无人机编队的飞行线路,求出每个簇成员到每个簇首节点 i 的 n 个时刻平均欧拉距离 L_i 和对应簇首 i 的节点度 d_i 。

$$L_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{i,j} \quad (3)$$

其中, $L_{i,j}$ 为 j 时刻簇成员到簇首 i 的欧拉距离, j 为 $[t, t + \Delta t]$ 分簇周期内取得的 n 个均匀离散的时间点, $i = 1, 2, \dots, N$ 且 i 为簇首。

步骤 4 簇成员根据平均欧拉距离 L_i 和节点度 d_i 计算到每个簇首的权值 W_i , 每个簇成员依次选取权重值最大的簇首, 加入该簇, 成为簇成员。

$$W_i = \varepsilon L_i + (1 - \varepsilon) |d_i - D| \quad (4)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$ 且 i 为簇首, ε 为权重系数, 可以根据实际需求进行设定, W_i 为当前簇成员到簇首 i 的权值, L_i 当前簇成员到簇首 i 的平均欧拉距离, d_i 为簇首 i 的节点度, D 为理想节点度。

1.3.2 WHEA-P 和 WCAA-P 比较分析

WHEA-P 和 WCAA-P 分别在簇首选举阶段和簇成员调整阶段考虑无人机编队的拓扑结构和飞行线路的影响, 实现节点的负载均衡, 达到延长网络生存时间的目的。相比较而言, WHEA-P 选择稳定度高的节点担任簇首, 簇内稳定的簇成员数目较多。因此簇首相比 WCAA-P 变动频率更低, 簇首结构更加稳定, 很少存在簇首由于簇内没有任何簇成员而寻求加入其他簇成为簇成员的情况。而 WCAA-P 中簇成员相比 WHEA-P 更加稳定, 变动频率更低, 这是因为每个簇成员依照自己的飞行线路, 优先选择与自身飞行线路最为接近的簇首, 并加入该簇。因此簇成员脱离原有簇的概率大大降低, 簇结构更加稳定。

2 仿真与结果分析

本文在 Matlab 环境中实现了 2 种无人机加权分簇的改进算法 (WHEA-P 和 WCAA-P), 并且对 2 种改进算法与最小 ID 号算法和 WCA 的性能进行了对比和分析。在无人机分簇算法中, 网络生存时间是重要的性能指标。网络生存时间定义为从无人机网络初始化到网络中首个节点死亡的时间^[15]。主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名	参数值
无人机数	10 ~ 100
仿真区域/km ²	20 × 20
威胁区的平均半径/m	5 000
威胁区的个数	2
无人机的飞行速度/(m · s ⁻¹)	0 ~ 50 之间的随机数
无人机的初始能量	2 000
通信半径/m	1 500 ~ 6 000
路径模型	路径规划得到的运动模型
仿真时长	400 个算法执行周期

2.1 WHEA-P 中稳定度的权重系数取值

本文通过改变 WHEA-P 中稳定度的权重大小 w_s , 研究该算法中网络生存周期 (算法执行周期数) 与稳定度的权重大小的关系。图 3 指出了无人机网络生存周期与稳定度的权重在不同仿真实验环境下的变化关系。由图 3 所示的仿真结果可知, 在 20 km × 20 km 的仿真监控区域中, 当稳定度的权重系数 w_s 接近 0.5 时, 网络生存周期取得最大值。因为当算法中稳定度的权重系数过小, 无法充分体现出路规划条件下, 无人机编队网络拓扑变化对分簇结构的影响; 而当稳定度权重系数过大, 也不能充分反映 WHEA-P 中其他因素 (例如节点剩余能量和无人机节点度与理想节点度的差) 带来的影响。本文给出参数 w_s 的建议取值区间为:

$$w_s \in [0.45, 0.55] \quad (5)$$

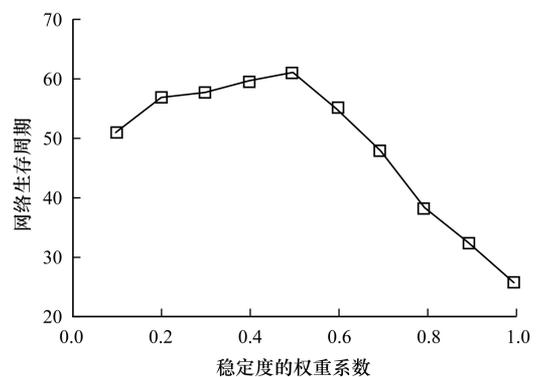


图 3 稳定度的权重系数 w_s 对网络生存周期的影响

2.2 基于路径规划的无人机分簇算法仿真

假定每个簇成员节点的能耗与该节点到其簇首节点的距离成正比, 簇首的能耗与簇内成员节点的数目成正比。设置无人机的初始能量值为 2 000。本文借助于路径规划, 对最小 ID 号算法 (本文所有图中标为 LeastID)、WCA 及 2 种改进的无人机加权分簇算法 (WHEA-P 和 WCAA-P) 的性能进行了详细的仿真实验与对比分析。图 4 展示了在 20 km × 20 km 的仿真实验区域中无人机节点的数量由 20 到 100 架的情况下, 基于路径规划的 4 种算法的仿真对比结果。

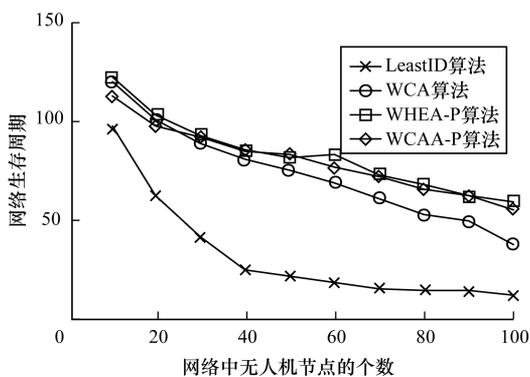


图4 基于路径规划的4种算法仿真结果对比

由图4可以看出,根据WHEA-P和WCAA-P获得的网络生存时间比最小ID号算法和WCA的网络生存时间长。无人机的网络生存时间会随着无人机的架数的增多而减小。产生这种变化的原因在于随着无人机架数的增多,簇内簇成员的数目不断增加,由于簇首的能耗与其成员节点的个数成比例,簇首的能量会急剧损耗,最终导致整个网络生存周期的缩短。但是随着无人机架数的增加,WHEA-P和WCAA-P性能要远远优于最小ID号算法和WCA。当无人机架数等于100的时候,WHEA-P和WCAA-P的网络生存时间要比WCA延长50%左右。

网络终止时无人机的平均剩余能量也是反映网络生命周期的一个重要指标。网络终止时,无人机的平均剩余能量越多,则网络负载越不均衡,网络的生存周期越短。结合图5可以看出,当无人机架数大于60架时,WHEA-P和WCAA-P的平均剩余能量要远小于最小ID号算法和WCA。

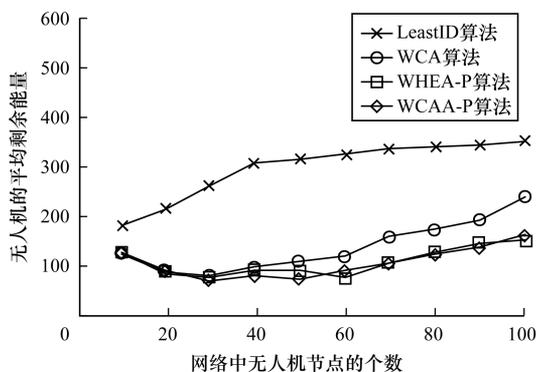


图5 网络终止后无人机的平均剩余能量

无人机平均重入簇次数是评价簇结构稳定性的一个重要指标。无人机节点重新加入其他簇的次数越少,那么簇的结构越稳定。如图6所示,单位时间内节点重入簇次数随节点的传输距离增大而减小。因为传输范围越大,簇的统治范围越大,节点脱离原有簇的概率减小。由于WCAA-P在簇成员调整阶段,每个簇成员根据拓扑结构的变化,选择飞行线路与自身最为接近的簇首,并加入该簇,因此相对其他3种算法而言性能最好,簇的稳定性最强。

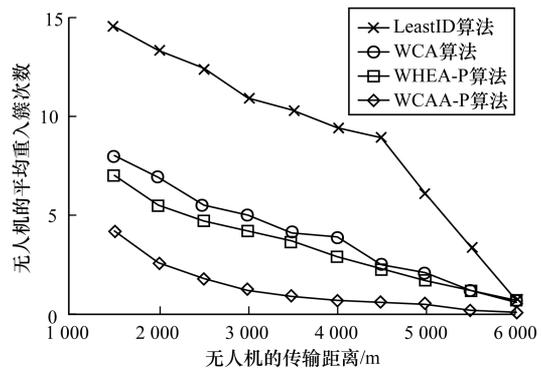


图6 单位周期内平均重入簇次数

无人机簇统治集更新次数^[16]也可以用来评价簇结构的稳定性。本算法规定当节点脱离原来的簇,而无法加入其他簇,则自己成为簇首,并触发统治集更新。图7反映了单位周期内无人机簇统治集更新次数随无人机传输距离变化的情况。随着传输距离的增大,无人机簇统治集更新次数变少。同样也是因为随着传输范围变大,簇的统治范围变大,节点脱离原有簇的概率变小。相比较而言,由于WHEA-P在簇首选举阶段选取的簇首节点具有邻居节点数目多,变动频率低和稳定性强的优点,因此很少存在簇首节点由于簇内没有任何簇成员节点而寻求加入其他簇,成为簇成员的情况。可以看出,WHEA-P簇首结构稳定度高,性能要略优于其他3种算法。

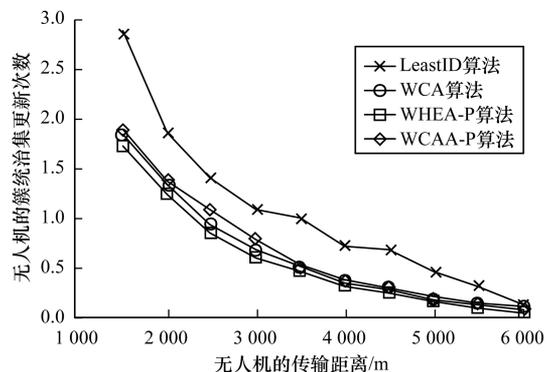


图7 单位周期内无人机簇统治集更新次数

WHEA-P和WCAA-P性能要优于最小ID号算法和WCA,它们的仿真指标曲线都非常接近。这是因为WHEA-P和WCAA-P分别在簇首选举阶段和簇成员调整阶段考虑无人机编队网络的拓扑变化对分簇结构的影响。WHEA-P中通过稳定度 S 这一参数,选择最合适无人机节点担任簇首,保证了无人机簇内簇成员的个数的稳定和数量的合理,实现了负载均衡,降低了簇首的能耗负担,从而增大了网络的生存周期。而WCAA-P在确定簇首后,每个簇成员借助于路径规划获得的飞行线路,通过比较自身与每个簇首的飞行线路的接近程度,并考虑每个簇首的簇内成员个数,选择最合适的簇首,成为其簇成员,也实现了网络的负载均衡和节点能耗的降低,延长了网络的生存周期。

3 结束语

本文针对现有的无人机分簇算法在没有充分考虑路径规划条件下,无人编队网络拓扑变化对分簇结构的影响所带来的弊端,采用基于 PSO 的无人机路径规划,实现了 2 种基于路径规划的无人机加权高效分簇方法(WHEA-P 和 WCAA-P)。WHEA-P 和 WCAA-P 分别在簇首选举阶段和簇成员调整阶段考虑无人机编队网络的拓扑结构变化带来的影响,从而实现均衡节点负载,延长网络生存时间的设计目标。仿真结果表明,WHEA-P 和 WCAA-P 的性能要优于最小 ID 号算法和 WCA,它们的网络生存周期更长并且负载更加均衡。在今后的研究工作中,将会继续考虑通信方式、服务质量、网络安全对无人机编队网络能耗的影响,进一步改进分簇方法,延长网络生存周期。

参考文献

- [1] BENTALEB A, BOUBETRA A, HAROUS S. Survey of clustering schemes in mobile ad hoc networks [J]. *Communications and Network*, 2013, 125(2): 8-14.
- [2] 王超,李长庚.一种基于相对移动性的 Ad-hoc 网络分簇算法[J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(3): 151-155.
- [3] LIN C R, GERLA M. Adaptive clustering for mobile wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(7): 1265-1275.
- [4] 苏金树,郭文忠,余朝龙,等.负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法[J]. *计算机学报*, 2014, 37(2): 445-456.
- [5] CHATTERJEE M, DAS S K, TURGUT D. WCA: a weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks[J]. *Cluster Computing*, 2002, 5(2): 193-204.
- [6] 苏金树,郭文忠,余朝龙,等.负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法[J]. *计算机学报*, 2014, 37(2): 445-456.
- [7] 陈慧杰,韩江洪,刘磊.无线传感器网络中自然能收集分簇路由算法研究[J]. *计算机工程*, 2016, 42(3): 143-147.
- [8] 唐翠微.稳定且负载均衡的移动 Ad Hoc 网络加权分簇算法[J]. *计算机系统应用*, 2016, 25(5): 129-134.
- [9] KOTI R B, KAKKASAGERI M S. Dynamic topology control in multiple clustered vehicular ad hoc networks [C]// *Proceedings of 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 1371-1375.
- [10] DAS P K, BEHERA H S, PANIGRAHI B K. A hybridization of an improved particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-robot path planning [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2016, 28(1): 14-28.
- [11] 刘创,吕娜,陈柯帆,等.一种面向航空集群的无人机中继网络部署策略[J]. *计算机工程*, 2018, 44(5): 107-112, 123.
- [12] PURCARU C, PRECUP R E, IERCAN D, et al. Hybrid PSO-GSA robot path planning algorithm in static environments with danger zones [C]// *Proceedings of the 17th International Conference on System Theory, Control and Computing*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 434-439.
- [13] ROBERGE V, TARBOUCHI M, LABONTÉ G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 132-141.
- [14] 张磊.移动自组网络协议关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [15] 李辉,刘书吉.基于节点度和距离的 WSN 分簇路由算法[J]. *计算机工程*, 2014, 40(3): 113-119.
- [16] 陶洋,李超,张传欣.移动自组织网络预测分簇算法的路由协议[J]. *电视技术*, 2014, 38(11): 97-102.
- [8] PHILIPP D, BAIER P, DIBAK C, et al. MapGENIE: grammar-enhanced indoor map construction from crowd-sourced data [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 139-147.
- [9] 周瑞,罗磊,李志强,等.一种基于智能手机传感器的行人室内定位算法[J]. *计算机工程*, 2016, 42(11): 22-26.
- [10] SCARLETT J. Enhancing the performance of pedometers using a single accelerometer [EB/OL]. [2017-07-17]. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/47076299220991AN_900.pdf.
- [11] 秦永元,张洪钺,汪叔华.卡尔曼滤波与组合导航原理[M].西安:西北工业大学出版社,1998.
- [12] 李艳,管斌,王成宾,等.电子磁罗盘航向角误差推导及分析[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(7): 1566-1572.
- [13] ESTER M, KRIEGEL H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, USA: ACM Press, 1996: 226-231.
- [14] VOGELS J, TAS A C, VENEKAMP J, et al. Partial linear fit: a new NMR spectroscopy preprocessing tool for pattern recognition applications [J]. *Journal of Chemometrics*, 1996, 10(5/6): 425-438.
- [15] EDELSBRUNNER H, KIRKPATRICK D, SEIDEL R. On the shape of a set of points in the plane [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1983, 29(4): 551-559.
- [16] HOLLAND S M. Principal components analysis (PCA) [EB/OL]. [2017-07-17]. <http://strata.uga.edu/8370/handouts/pcaTutorial.pdf>.

编辑 刘盛龄

(上接第 275 页)

编辑 刘盛龄