

# 激光与光电子学进展

## 无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法

赵太飞<sup>1,2\*</sup>, 程敏花<sup>1</sup>, 张港<sup>1</sup>, 容开新<sup>1</sup>, 郑博睿<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000

**摘要** 针对强电磁干扰下无人机蜂群的任务协同要求,为了尽可能延长无人机编队在空中的作业时间,提高任务完成效率,结合紫外光散射通信特点,提出了一种无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法。该算法通过引入距离项和能量项,对非均匀分簇算法的候选簇首选举的阈值门限进行了改进,并在簇间通信过程中,簇首节点可以选择最佳的数据传输路由将信息转发至长机。仿真结果表明,与现有算法 LEACH 和 EEUC 相比,改进算法下网络的能量效率分别提高了 21.02% 和 3.92%,无人机网络的生存期分别延长了 23.5% 和 5.6%,有效均衡了无人机蜂群网络节点的能量消耗并延长了生存期。

**关键词** 光通信; 紫外光通信; 无人机蜂群; 路由算法; 能效优化

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0506005

### Energy Efficiency Optimization Routing Algorithm for Wireless Ultraviolet Cooperative UAV swarm

Zhao Taifei<sup>1,2\*</sup>, Cheng Minhua<sup>1</sup>, Zhang Gang<sup>1</sup>, Rong Kaixin<sup>1</sup>, Zheng Borui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks,  
Xi'an, Shaanxi 710000, China

**Abstract** Relative to the collaborative task requirements of an unmanned aerial vehicle (UAV) swarms under strong electromagnetic interference, an energy efficient optimization routing algorithm for wireless ultraviolet cooperative UAV swarms is proposed. The proposed algorithm exploits the advantages of the ultraviolet scattering communication to maximize the air operation time of the UAV and the efficiency of mission completion. The proposed algorithm improves the threshold of the candidate cluster head selection of non-uniform clustering algorithm by introducing distance and energy. In the inter-cluster communication process, cluster head nodes can select the optimum data transmission route to forward the information to the lead UAV. Compared to LEACH and EEUC, the simulation results reveal that the proposed algorithm increases the energy efficiency of the UAV network by 21.02% and 3.92%, respectively. Moreover, the lifetime of the network is extended by 23.5% and 5.6%, respectively. Therefore, the proposed algorithm can efficiently balance the energy consumption of the nodes and extend the lifetime of the UAV swarms.

**Key words** optical communications; ultraviolet communication; unmanned aerial vehicle swarm; routing algorithm; energy efficiency optimization

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省教育厅科研计划项目(17-JF024)、陕西省重点产业链创新计划项目(2017ZDCXL-GY-05-03)、西安市碑林区科技计划项目(GX1921)、榆林市科技计划项目(2019-145)、西安市科学计划项目[CXY1835(4)]

通信作者: \*zhaotaifei@163.com

## 1 引言

无人机(UAV)是一种可重复使用、能执行各种指定任务的空中飞行器,具有结构简单、操控方便和作战能力强等优势<sup>[1]</sup>,被广泛应用于农情监测、快递运送、搜索救援、环境检测等民用领域,以及战场情报搜集、危险评估、电子对抗、目标打击等军事领域<sup>[2-4]</sup>。通过一群自主组网协同作业的低成本小型无人机<sup>[5]</sup>而组建的无人机蜂群系统,相较于单无人机作战而言,在侦查范围、环境感知、攻击强度和网络抗毁方面都具有显著优势。在实际飞行中,无人机编队通信网络不可避免地会受到强电磁干扰和复杂大气环境等自然或人为环境的影响<sup>[6]</sup>,导致无人机的任务执行能力降低。无线紫外光通信主要利用大气中微粒对“日盲波段”(200~280 nm)紫外光的散射进行信息传输<sup>[7]</sup>,将其应用于无人机蜂群机间通信中,具有抗电磁干扰能力强、全天候非直视(NLOS)通信、低窃听率、易于机载等优势<sup>[8]</sup>。

在实际作战飞行中,无人机编队机载能源有限<sup>[9]</sup>,因此在机间信息指令交互时设计能效优化的通信路由算法可以有效延长编队的作业时间。文献[10]在无人机集群内部通信时,通过设置路径权值函数找到最优的数据转发路径,使得簇头与簇内节点通信时的数据传输时间和能耗最小。Zang等<sup>[11]</sup>综合考虑了无人机节点的移动性、连通度、电功率等因素,为无人机网络设计了一种基于移动预测的分簇路由算法,该算法可以使构建的簇结构更加稳定,且有效地提升了无人机网络的性能,但没有分析无人机通信能耗会对网络存活时间产生影响。文献[12]设计了一种动态聚类方案来降低无人机的能耗,分析结果表明,选择合适的簇首选举方案可以有效实现无人机机间的稳定连接并降低能量消耗。Chen等<sup>[13]</sup>提出了一种非均匀分簇路由算法 EEUC (Energy-Efficient Unequal Clustering),该算法通过非均匀竞争半径使越靠近会聚节点的簇的成员越少,因此可以降低簇内能耗而留出能量进行簇首间的信息转发,但未考虑在簇首选举阶段,候选簇首的数目较多,在传递控制信息上会消耗过多能量。

基于以上分析,为了延长无人机蜂群的空中作业时间,本文研究了无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法。该算法首先根据无人机节点性能对 EEUC 算法的候选簇首选举门限进行了改进,

有效控制了簇首的生成数目,然后在簇间信息传输过程中,考虑通信能耗和节点能量,通过选择最佳的中继节点将数据转发至长机。经仿真结果验证,所提算法可以有效延长无人机蜂群网络的存活时间。

## 2 无人机非均匀分簇模型与紫外光通信模型

### 2.1 非均匀分簇模型

无人机蜂群采用“长机-僚机”的队形控制策略<sup>[14]</sup>,每个无人机节点的初始能量相同且标识ID唯一。采用分层式编队信息交互策略<sup>[15]</sup>将无人机蜂群划分成长机、簇首僚机和成员僚机三个部分。成员僚机将本机数据发送至簇首僚机,经信息融合后簇首再将数据转发至长机,长机根据收到的信息进行任务决策。

在机间通信链路未建立之前,首先长机利用机载紫外光装置向全网广播消息,消息中包含长机的实时空间位置、速度和航向信息,各僚机节点根据接收到的位置信息计算与长机之间的距离,根据此距离可得出无人机节点的非均匀竞争半径。其次,各僚机节点根据自身ID信息在对应的时隙内广播包含节点ID、位置、速度和剩余能量的邻居发现消息,无人机节点接收到此消息后可计算出各僚机间的距离。如图1所示,利用非均匀竞争半径将无人机集群划分为规模不等的圆,远离长机的簇规模较大,越靠近长机的簇的成员僚机数量越少,因此离长机较近的簇首可以节约簇内的能耗用于簇间数据转发,实现簇首能耗均衡的目的。在数据传输阶段,簇内僚机在簇首节点分配的通信时隙内将数据以单跳的方式发送至簇首,簇首通过选择最佳的中继簇首节点将信息以多跳的方式转发至长机以降低能量消耗。

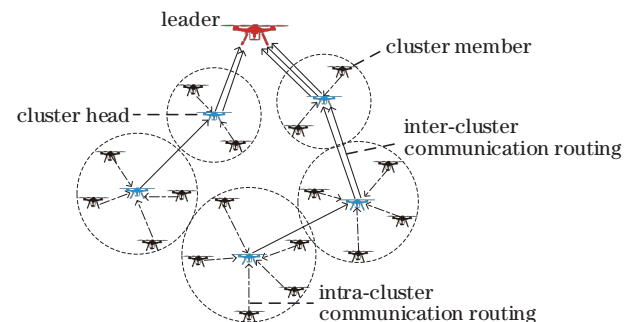


图1 无人机非均匀分簇模型

Fig. 1 Unequal clustering model of UAV swarm

## 2.2 机间紫外光通信链路模型

无线紫外光通信根据传输方式的不同分为直视通信(LOS)和非直视通信。LOS通信是指无线紫外光通信系统的发射端在接收端的视场范围内且两者之间不存在障碍物。NLOS通信是指利用紫外光的散射特性可以使光信号绕开收发端之间的障碍物到达接收端的通信模式。蜂群无人机在实际作战过程中,周围环境复杂多变,紫外通信系统的收发端很难保持对准且存在障碍物遮挡的情况,无人机编队采用LOS通信方式很容易出现机间通信链路中断的情况<sup>[16]</sup>。紫外光NLOS通信具有全方位性、能克服各种地形障碍、无需对准等特点,更能满足复杂战场环境下无人机的可靠通信需求。紫外光NLOS散射通信链路模型如图2所示,收发端 $R_x$ 和 $T_x$ 的间距为 $r$ , $r_1$ 和 $r_2$ 为有效散射体 $V$ 分别到 $T_x$ 和 $R_x$ 的距离, $\theta_1$ 为发送仰角, $\phi_1$ 为发散角, $\theta_2$ 为接收仰角, $\phi_2$ 为接收视场角, $\theta_s$ 为散射角。当 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的取值都小于 $90^\circ$ 时,紫外光通信模式属于NLOS(c)类,在此通信方式下,传输链路损耗小,通信带宽最宽<sup>[17]</sup>,更适合将其作为无人机蜂群的机间通信方式。

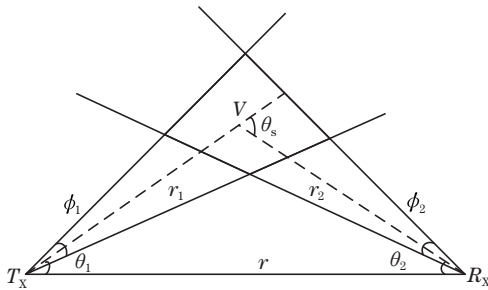


图2 紫外光NLOS散射通信链路模型  
Fig. 2 Ultraviolet NLOS scattering communication link model

紫外光在大气中通信时衰减严重,随着通信收发间距的增大,路径损耗以指数形式衰减,在近距通信时,可以将路径损耗公式<sup>[18]</sup>简化为

$$L = \xi r^\alpha, \quad (1)$$

式中: $\xi$ 是路径损耗因子; $\alpha$ 是路径损耗指数。均与收发端几何角度有关。

## 2.3 无人机蜂群机间通信能耗模型

无人机蜂群编队采用无线紫外光作为机间通信方式时,传输衰减<sup>[17]</sup>所损耗的能量 $E_L$ 为

$$E_L = E_T(1 - 1/L), \quad (2)$$

式中: $E_T$ 为发射单位比特数据所消耗的能量。

当无人机数据收发节点相距为 $r$ 时,发送 $k$  bit的数据其所消耗的发送数据能耗 $E_{TX}$ 和接收数据能耗 $E_{RX}$ 分别为

$$E_{TX}(k) = k(E_T + E_L), \quad (3)$$

$$E_{RX}(k) = kE_R, \quad (4)$$

式中: $E_R$ 为接收单位比特数据所消耗的能量。

此外,簇首需要对成员信息进行融合来消除数据冗余,数据融合时使用的能量 $E_c$ 为

$$E_c(M, k) = (M + 1)kE_{DA}, \quad (5)$$

式中: $E_{DA}$ 为融合单位比特数据消耗的能量; $M$ 为簇内成员僚机的个数。

## 3 能效优化路由算法

本文所提的无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法实现由协议簇的建立和数据传输两部分组成。无人机蜂群在簇的建立阶段进行簇首选举并形成簇结构,数据传输阶段通过选择最佳的簇首节点将信息以多跳的方式转发至长机。

### 3.1 协议簇的建立

无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法其协议簇的建立步骤具体如下。

1) 设每个无人机节点依概率 $T(n)$ 成为候选簇首,所有无人机节点都随机产生取值范围在 $0 \sim 1$ 的数 $t$ ,当 $t \geq T(n)$ 时节点进入睡眠状态,当 $t < T(n)$ 时节点当选为候选簇首。

在EEUC协议中,所有节点被选举为候选簇首的可能性都相同,这可能会导致部分剩余能量较低的节点当选簇头次数过多而较早死亡等问题<sup>[13]</sup>。因此本文从无人机节点的自身状态出发,综合考虑了无人机剩余能量和节点到长机的距离,通过引入优先级函数 $C_i$ 后改进的软阈值门限 $T(n)$ 为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{pC_i}{1 - p(r \bmod \frac{1}{p})}, & n \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

其中

$$C_i = \omega_1 \frac{E_{\text{rest}}(r)}{E_0} + (1 - \omega_1) \frac{1}{d_{s_i, \text{leader}}^2(r)}, \quad (7)$$

式中: $p$ 为期望候选簇头数占总无人机数的百分比; $r$ 是当前运行轮数; $G$ 为在之前 $1/p$ 轮中没有被选为簇首的节点集合; $\omega_1$ 为权值系数; $E_0$ 为节点初始能量; $E_{\text{rest}}(r)$ 为第 $r$ 轮中节点 $i$ 的剩余能量; $d_{s_i, \text{leader}}(r)$ 为节点 $i$ 到长机的距离。如(6)式和(7)式所示,改

进后的算法通过改进阈值选举门限增大了剩余能量多、距离长机近的节点成为候选簇首的概率,进而控制了簇首的生成数目,可以有效减少控制信息能耗并避免低能量节点较早死亡的情况。

2) 将候选簇首  $s_i$  的最大竞争半径定义为  $R_0$ ,  $c$  为值在 0~1 内的控制竞争半径取值的参数,则  $s_i$  确定竞争半径  $R_{\text{comp}}$  的公式<sup>[13]</sup>为

$$R_{\text{comp}} = \left[ 1 - c \frac{d_{\text{max}} - d(s_i, s_{\text{leader}})}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}} \right] R_0, \quad (8)$$

式中:  $d_{\text{min}}$  和  $d_{\text{max}}$  分别为无人机节点距长机的距离最近和最远值;  $s_i$  至长机的距离为  $d(s_i, s_{\text{leader}})$ 。由(8)式可知,当  $d(s_i, s_{\text{leader}})$  较小时,竞争半径  $R_{\text{comp}}$  的值就较小,因此构建的协议簇规模及簇内成员僚机数就越小,簇首节点可以节省能量用于数据转发。

3) 每个候选簇首都根据公式建立邻居簇头集合  $s_{i\text{-CH}}$ , 选举的最终簇首为集合内剩余能量最大的节点,最终簇首竞选成功后,其竞选半径内的所有节点不再参与本轮簇首选举过程。

$$s_{i\text{-CH}} = \left\{ s_j \mid s_j \text{ is candidate CH, and } d(s_i, s_j) < \max(R_{\text{comp}si}, R_{\text{comp}sj}) \right\}, \quad (9)$$

式中:  $d(s_i, s_j)$  为节点  $s_i$  和节点  $s_j$  之间的距离;  $R_{\text{comp}si}$ 、 $R_{\text{comp}sj}$  分别为  $s_i$  和  $s_j$  的竞争半径。

4) 完成簇首选举任务后,唤醒网络中处于休眠状态的普通节点即非候选簇首节点。簇首向无人机网络广播竞选成功的消息,非候选簇首节点加入到接收信号最强的簇首中完成入簇过程。

### 3.2 数据传输

在簇间数据传输过程中,不同簇首的数据冗余度有限,簇首对于接收到的其他簇首数据不进行融合只单纯地转发。引入阈值  $X_{\text{TD\_MAX}}$ ,  $X_{\text{TD\_MAX}}$  决定了无人机节点与长机直接通信的区域,若  $d(s_i, s_{\text{leader}}) < X_{\text{TD\_MAX}}$ , 簇首与长机直接通信。若  $d(s_i, s_{\text{leader}}) \geq X_{\text{TD\_MAX}}$  时,本文综合考虑发送节点和接收节点之间的距离  $d(s_i, s_j)$ 、接收节点和长机之间的距离  $d(s_j, s_{\text{leader}})$ , 以及接收节点的剩余能量  $E_{\text{rest}}(j)$  三个因素,通过构建路径权值函数选择使  $E_{\text{relay}}$  最小的簇首  $s_j$  作为下一跳转发节点。

$$E_{\text{relay}}(j) = \frac{d(s_i, s_j) \cdot d(s_j, s_{\text{leader}})}{E_{\text{rest}}(j)}. \quad (10)$$

由(1)式和(3)式可知,数据收发能耗与通信距离有关,若将通信能耗作为选择下一跳转发节点的依据,那么低能量的簇首节点可能会因为数据转发消耗能量而较早死亡。若仅以簇首节点的剩余

能量作为考虑的唯一因素而忽略通信能耗,将会大大减少无人机的能量利用率。因此(10)式结合通信能耗和节点能量,当  $d(s_i, s_j)$  和  $d(s_j, s_{\text{leader}})$  的值越小,  $E_{\text{rest}}(j)$  越大,则  $E_{\text{relay}}$  的值就越小,因此  $s_j$  就越容易被选为下一跳中继节点,实现了簇首间的能耗均衡。

## 4 仿真分析

本文的仿真区域设置为  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ , 100 个无人机节点都具有相同的航向和飞行速度,各无人机目标状态协同一致,网络拓扑不发生变化。仿真中 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 和 EEUC 分别代表经典 LEACH 分簇算法和非均匀分簇算法 EEUC 所得结果, IEEUC (Improvement of EEUC) 代表本文所提改进算法后所得结果,在相同场景下仿真对比了 LEACH、EEUC 和 IEEUC 算法。仿真实验中  $X_{\text{TD\_MAX}} = 140 \text{ m}$ ,  $R_0 = 90 \text{ m}$ ,  $c = 0.5$ <sup>[19]</sup>。其余参数取值如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
Parameter	Value
Wavelength $\lambda$ /nm	266
Initial energy $E_0$ /J	300
$E_T, E_R$ / $\mu\text{J}$	8
$E_{\text{DA}}$ / $\mu\text{J}$	0.8
$\theta_1, \theta_2$ /( $^\circ$ )	40
$\phi_1, \phi_2$ /( $^\circ$ )	30
Path loss factor $\xi$	$1.69 \times 10^8$
Path loss exponent $\alpha$	1.3498
Data packet size /bit	5000
Control packet size /bit	400
$\omega_1$	0.5

### 4.1 算法性能分析

图 3 仿真了随着  $c$  值变化,簇首数目和  $R_0$  之间的关系。由图 3 可以看出,簇首的数目主要由  $R_0$  决定,随着  $R_0$  的增大,簇首数目变小,覆盖网络所需的集群数量就越小。由前文分析可知,簇的非均匀程度由  $c$  确定,当  $R_0$  取值相同时,候选簇首的竞争半径随  $c$  值的变小而增大,因此覆盖网络所需要的簇首数目就越小。

图 4 仿真了在 IEEUC 算法下,权重系数  $\omega_1$  与无人机网络存活时间之间的关系。由(7)式可知,当  $\omega_1$  越小时,选举的候选簇首更倾向于距离长机较

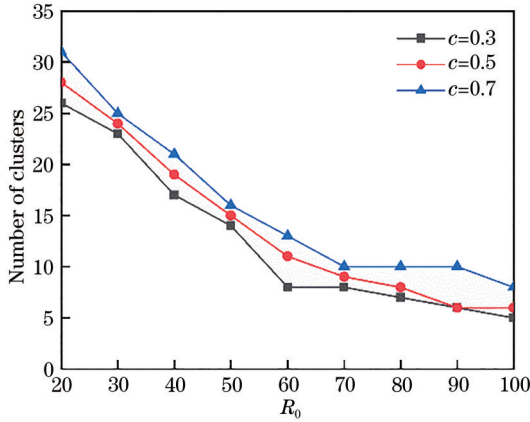


图 3 簇首数目

Fig. 3 Number of cluster heads

近的节点,减少了数据传输过程中的通信能耗,但可能会导致低能量的节点承担负载过重而提前死亡。增大  $w_1$  的值,此时剩余能量大的节点成为候选簇首的可能性变大,但是忽略了节点通信能耗的有效性。由图 4 可以看出,当  $w_1$  取 0.5 时,能量项和距离项对优先级函数  $C_i$  的作用比重相同,因此无人机网络的存活时间最长。

图 5 仿真了 IEEUC 算法在不同节点密度下的节点死亡速度和平均剩余能量,仿真区域分别为  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 、 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$  和  $600\text{ m} \times 600\text{ m}$ 。

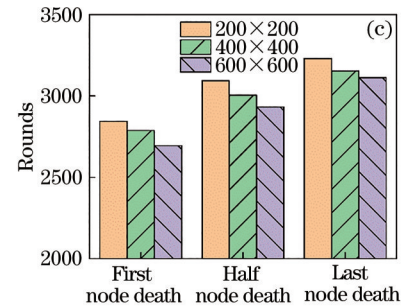
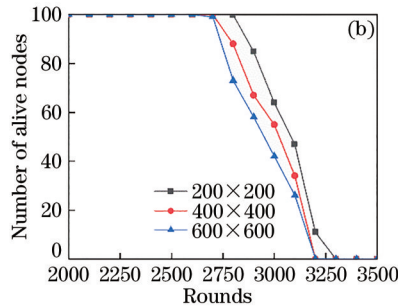
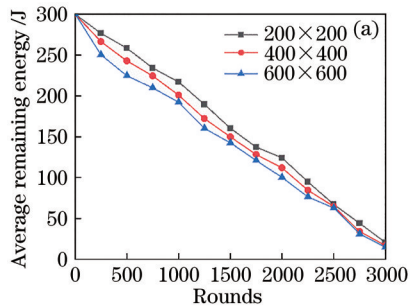


图 5 不同节点密度下的网络性能对比。(a)平均剩余能量;(b)存活节点数;(c)网络生存期对比

Fig. 5 Comparison of network performance under different node densities. (a) Average remaining energy; (b) number of alive nodes; (c) network lifetime comparison

#### 4.2 算法对比分析

一个稳定的分簇路由算法应该生成数目相对一致的簇首来优化网络能量消耗<sup>[19]</sup>。图 6 从每种分簇路由协议的模拟中随机选择了 100 轮,统计了生成簇首数目的情况。如图 6 所示,LEACH 算法在簇首选举时具有随机性,没有考虑网络热区问题,因此簇首分布不均且簇首数目波动方差为 5.11。EEUC 和 IEEUC 算法通过候选簇首局部竞争的方法,使得簇首数目相较于 LEACH 算法得到了有效

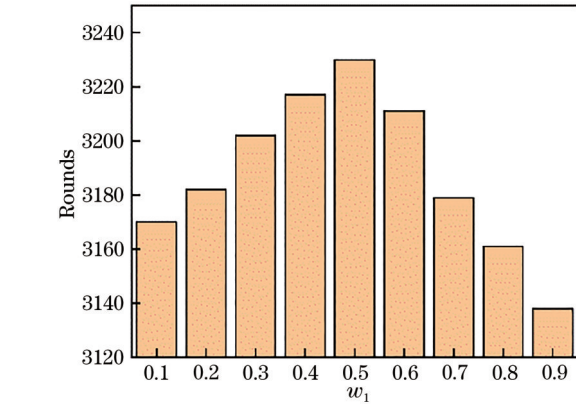


图 4 网络生存期随  $w_1$  变化关系

Fig. 4 Network lifetime varies with  $w_1$

由图 5 可知,无人机节点的密度越大,网络的平均剩余能量就越多,且当无人机节点的密度增加时,节点的死亡速度就越迟缓。如图 5(c) 所示,在仿真区域为  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  下,1% 节点、50% 节点以及全部节点死亡所经历的时间,分别比在  $400\text{ m} \times 400\text{ m}$  下延长了 2%、2.9%、2.4%,比在  $600\text{ m} \times 600\text{ m}$  下延长了 5.6%、5.9%、3.8%。这是因为给定区域内机间通信距离随无人机节点密度的减小而增大,由 (2) 式可知,机间采用紫外光进行通信时传输衰减所损耗的能量就会越多,无人机网络的能量消耗速率要更快。

控制。但在 EEUC 算法中,各无人机节点成为候选簇首的可能性相等,即仍为随机选取,造成最终选举的簇首数目不稳定的情况,其波动方差为 2.41。而本文 IEEUC 算法结合无人机节点特性改进了候选簇首选举的阈值门限  $T(n)$ ,因此相较于前两种算法生成簇首数目比较稳定,簇首数目的波动方差为 1.09。

网络的生命周期是衡量无人机通信路由算法优劣的重要指标,因此图 7 对比了不同算法下无人

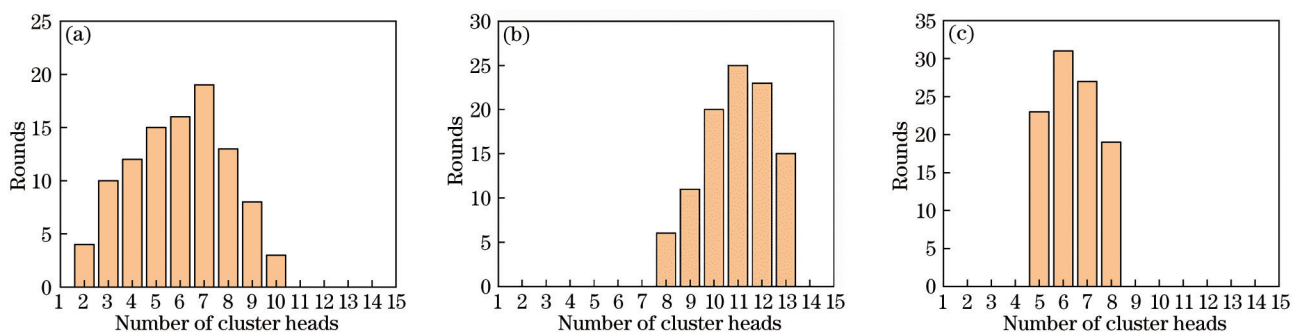


图 6 不同算法下生成簇首数目分布。(a) LEACH; (b) EEUC; (c) IEEUC

Fig. 6 Distributions of the number of cluster heads under different algorithms. (a) LEACH; (b) EEUC; (c) IEEUC

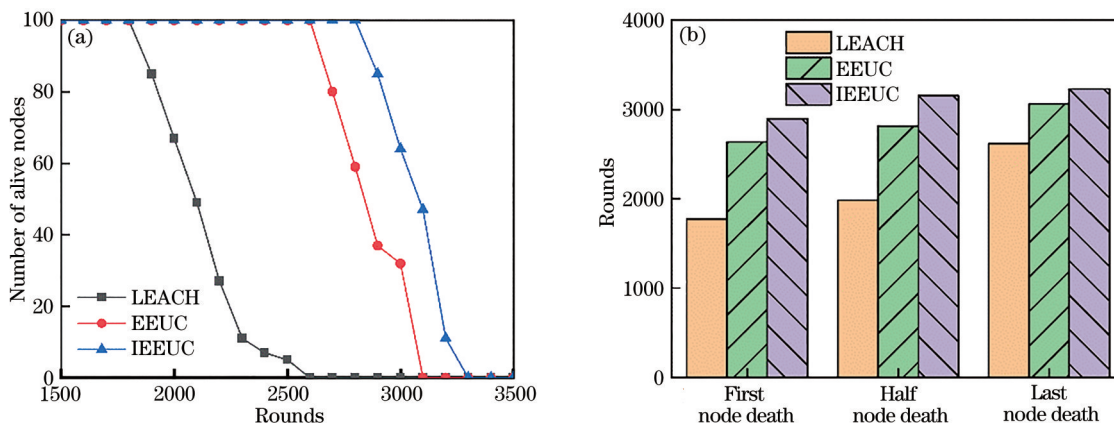


图 7 不同算法下无人机网络生存期对比。(a) 存活节点数; (b) 网络生存期

Fig. 7 Comparison of UAVs network lifetime under different algorithms. (a) Number of alive nodes; (b) network lifetime

机网络中节点的死亡情况。由图 7(a)可知, IEEUC 算法下第一个节点和最后一个节点的死亡时间均迟于其余两种算法, 无人机网络中首个节点死亡到全部节点死亡的时间可以用来衡量能量的使用效率, 时间越短能量利用效率越高<sup>[19]</sup>, IEEUC 算法能量效率为 89.62%, 而 LEACH 为 68.6%, EEUC 为 85.7%, 由此验证了本文所提路由协议的高效性。由图 7(b)可知, IEEUC 算法下 1% 节点、50% 节点以及全部节点死亡所经历的时间, 分别比 LEACH 算法延长了 63.6%、59.1%、23.5%, 比 EEUC 算法延长了 9.8%、12.2%、5.6%, 因此 IEEUC 算法延长了无人机网络的生命周期。

图 8 分析了无人机网络节点能耗的均衡情况, 由图 8 可以看出, 无人机网络运行的轮数越多, 簇首节点由于其接收、融合和转发数据的负载相比于其他普通节点大, 从而导致其与网络中其余普通节点的剩余能量相差变大, 因此 3 种路由算法下的方差曲线均呈上升趋势, 并且 IEEUC 算法的方差曲线始终位于 LEACH 算法和 EEUC 算法曲线之下, 证明本文所提算法的节点能量消耗均衡性要优于其余

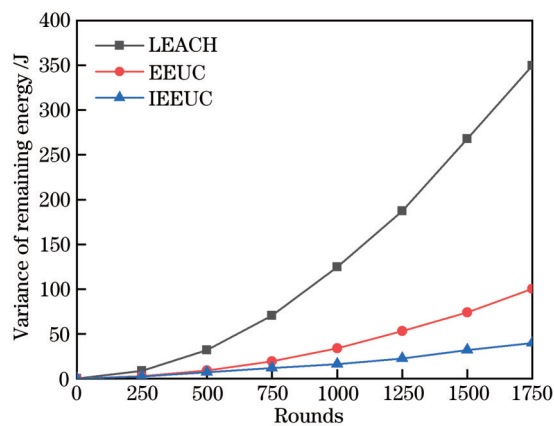


图 8 剩余能量方差

Fig. 8 Variance of remaining energy

两种算法。

图 9 进一步对比了 3 种算法下无人机网络节点的平均剩余能量。由图 9 可以看出, 轮数的增大导致网络中无人机节点的平均剩余能量逐渐减小, IEEUC 算法下节点的能耗均衡性要优于 LEACH 和 EEUC 算法, 无人机网络的存活时间也最久, 因此在相同轮数下 LEACH 和 EEUC 算法的平均剩余能量均低于 IEEUC 算法。

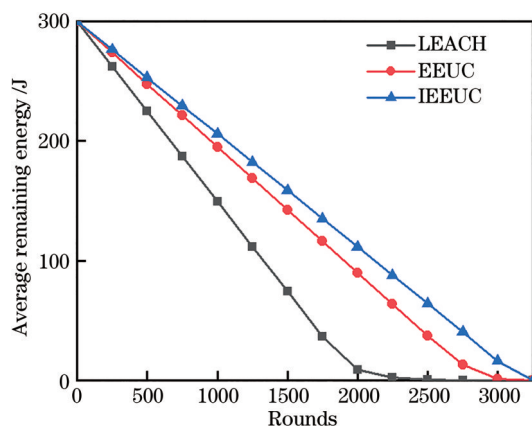


图9 平均剩余能量

Fig. 9 Average remaining energy

## 5 结 论

为了尽可能延长无人机蜂群的空中作业时间, 本文结合紫外光通信的优势, 通过无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法来提高无人机蜂群节点的能量效率。该算法使选举的候选簇首节点更偏向于能量高和距离长机更近的节点, 在簇间通信过程中通过构建的路径权值函数, 选择最佳的中继节点将数据以多跳路由的方式发送至长机, 有效平衡了簇首间的能耗。仿真结果表明, 本文算法下网络的能量效率与节点能耗的均衡性都要优于 LEACH 和 EEUC 算法, 并且有效地延长了无人机蜂群的作战时间。

## 参 考 文 献

- [1] Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVs design, development, and deployment[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [2] Wu H S, Li H, Xiao R B, et al. Modeling and simulation of dynamic ant colony's labor division for task allocation of UAV swarm[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 491: 127-141.
- [3] Jiang Z Y. Research on anti-disturbance methods for multi-rotor unmanned aerial vehicles based on online estimation[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2017.  
江紫亚. 基于在线估计的多旋翼无人机抗扰动方法研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2017.
- [4] Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0406001.
- [5] 宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0406001.
- [6] Wiese D, Hu W H. The rapid development of UAV swarm combat capability in China[J]. Global Military, 2017, 22: 68-68.  
道格拉斯·威斯, 胡文翰. 中国大力发展无人机“蜂群”作战能力[J]. 环球军事, 2017(22):68-68.
- [7] Shalaby M, Saad W, Shokair M, et al. Evaluation of electromagnetic interference in wireless broadband systems[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(2): 2223-2237.
- [8] Luo C, Li J Y, Chen X M. Analysis of channel of wireless ultraviolet communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(4): 040602.  
刘畅, 李霁野, 陈晓敏. 无线紫外通信信道分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(4): 040602.
- [9] Zhao T F, Liu P, Ma Q W. Wireless ultraviolet guided method of unmanned aerial vehicle matching terrain flight[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0206001.  
赵太飞, 刘萍, 马倩文. 无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0206001.
- [10] Zeng Y, Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [11] Ho D T, Grøtli E I, Shimamoto S, et al. Optimal relay path selection and cooperative communication protocol for a swarm of UAVs[C]//2012 IEEE Globecom Workshops, December 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1585-1590.
- [12] Zang C H, Zang S H. Mobility prediction clustering algorithm for UAV networking[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops, December 5-9, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1158-1161.
- [13] Park J H, Choi S C, Hussen H R, et al. Analysis of dynamic cluster head selection for mission-oriented flying Ad hoc network[C]//2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), July 4-7, 2017, Milan, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 21-23.
- [14] Chen G H, Li C F, Ye M, et al. An unequal cluster-

- based routing protocol in wireless sensor networks [J]. *Wireless Networks*, 2009, 15(2): 193-207.
- [14] Yuan W, Chen Q Y, Hou Z X, et al. Multi-UAVs formation flight control based on leader-follower pattern[C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC), July 26-28, 2017, Dalian, China. New York: IEEE Press, 2017: 1276-1281.
- [15] Tang S Y, Qin Z, Xin J K. Collaborative task assignment scheme for multi-UAV based on cluster structure[C]//2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 26-28, 2010, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2010: 285-289.
- [16] Liu T, Jia S M. Collision avoidance algorithm for unmanned aerial vehicle group based on wireless ultraviolet communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 212805.  
刘涛, 贾遂民. 基于无线紫外线通信的无人机集群防撞定位算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 212805.
- [17] Zhao T F, Xu S, Qu Y, et al. Cluster-based algorithm of reconnaissance UAV swarm based on wireless ultraviolet secret communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 967-972.  
赵太飞, 许杉, 屈瑶, 等. 基于无线紫外光隐秘通信的侦察无人机蜂群分簇算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 967-972.
- [18] Chen G, Xu Z Y, Ding H P, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [19] Li C F, Chen G H, Ye M, et al. An uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(1): 27-36.  
李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. *计算机学报*, 2007, 30(1): 27-36.