

激光与光电子学进展

基于紫外光隐秘通信的无人机编队分簇优化算法

赵太飞^{1,2*}, 容开新¹, 曹丹丹¹, 张爽^{1,2}

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²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 针对复杂战场环境下无人机(UAV)执行渗透侦察任务时对通信网络的隐秘性需求,考虑节点携带能源有限且在数据传输时能量消耗的不均衡问题,提出了一种基于紫外光通信的UAV编队分簇优化算法。首先,在建立机间无线紫外光通信链路模型和能量消耗模型的基础上,结合最优刚性图的优势,对低功耗自适应分层型协议(LEACH)算法的簇首选举和簇间通信过程进行改进。然后,引入节点剩余能量和链路可靠性的权值函数选举簇首,簇首间通过生成最优刚性图进行拓扑优化。仿真结果表明,该算法在提高簇间连通性的同时延缓了网络出现节点死亡的现象,相比LEACH算法,网络第一次出现死亡节点和出现一半死亡节点的时间分别延长了25.2%和21.4%,且兼顾了网络的连通性和能耗均衡性。

关键词 光通信; 无人机编队; 无线紫外光通信; 最优刚性图; 能耗均衡

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1306004

Clustering Optimization Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Formation Based on Ultraviolet Security Communication

Zhao Taifei^{1,2*}, Rong Kaixin¹, Cao Dandan¹, Zhang Shuang^{1,2}

¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

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

Abstract In view of the secret demand of communication network for unmanned aerial vehicle (UAV) in penetrating reconnaissance mission under the complex battlefield environment, considering the limited energy carried by nodes and the unbalanced of energy consumption during the data transmission, a clustering optimization algorithm for UAV formation based on ultraviolet communication is proposed in this paper. First, on the basis of establishing the wireless ultraviolet communication link model and energy consumption of nodes, the selection of cluster heads and inter-cluster communication process of low energy adaptive clustering hierarchy (LEACH) algorithm is improved. Then, the weight functions of node residual energy and link reliability are introduced to select cluster heads, and the topology optimization between cluster heads is carried out by generating optimally rigid graph. The simulation results show that the algorithm improves the connectivity between clusters and delays the phenomenon of node death in the network. Compared with the LEACH algorithm, the time for the first occurrence of dead nodes and half of dead nodes in the network is delayed by 25.2% and 21.4%, respectively. The connectivity and energy balance of the network are improved.

Key words optical communications; unmanned aerial vehicle formation; wireless ultraviolet communication; optimally rigid graph; energy-balancing

1 引言

随着军事作战要求的增加和社会发展的需要,无

人机(UAV)技术不断成熟并在不同领域被广泛应用,如新闻拍摄、航拍测绘、森林救灾、快递运送等民用领域和战场情报搜集、电子对抗、侦查监视、危险评估领

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-08-20; 录用日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-044)、西安市碑林区科技计划(GX1921)、榆林市科技计划(2019-145)、西安市科学计划(CXY1835(4))

通信作者: *zhaotaifei@163.com

域^[1]。随着作战环境的高动态化、高对抗化、强干扰化,单个无人机的打击强度和侦查范围有限,其战场存活能力和任务完成能力也受到一定限制^[2],而多个无人机协同组成的无人机编队网络可以提升任务的执行效率。无人机编队网络在实际飞行过程中会受到强电磁干扰和大气环境等因素的影响,因此,机间信息实时共享和可靠通信是保障整个编队网络高效执行任务的重要前提,采用新型机间通信方式提高无人机编队网络的有效性和可靠性是非常必要的^[3]。无线紫外光(UV)通信是以紫外光波作为载体,在大气信道中传输时通过大气分子或微粒的散射使信号到达接收端的通信方式,通常采用 200~280 nm 波段的“日盲”紫外光^[4]。该波段的紫外光具有抗电磁干扰能力强^[5]、全天候非直视^[6]和隐秘通信能力强等优势,可提高编队通信的可靠性和稳定性。

多无人机编队控制始终作为基础支撑多无人机系统执行作战任务,如组建编队、分配路径,在执行任务时无人机编队控制技术可以使无人机更好地融入态势环境^[7]。图论理论被广泛应用于无人机的编队控制中,基于刚性图构建的编队通信网络拓扑可以保持编队队形。Hendrickx 等^[8]将刚性图理论用于多智能体编队的协调与控制中,但生成的最小刚性图在解决编队合并的实际问题上还有待进一步研究。史浩宇^[9]引入均匀量化器,提出了一种固定拓扑结构下的编队控制算法,但该算法没有考虑多旋翼飞行器的偏航通道,稳态性不足。张佳龙等^[10]基于图论建立任意两架无人机之间的通讯模式,通过反步推演法得到多无人机编队队形保持的导引控制律,该算法动态响应快且稳态误差小。Luo 等^[11-12]考虑到编队通信的复杂性和成本,提出了一种生成最优刚性图的集中式和分布式算法,但该算法没有考虑编队网络中通信链路的稳定性和可靠性。方斌等^[13]研究了无人机节点加入和退出时编队网络的稳定性问题,并提出了一种基于刚性图保持编队队形的算法。

在战场环境下,无人机编队可潜入敌方空域完成情报侦查和监视任务^[14]。但无人机在实际应用中携带的能量有限,因此,选取有效的编队分簇算法对提高无人机战场存活率及打击效率具有重要意义。分簇管理算法可以简化大规模无人机编队网络的拓扑结构,从而提升网络性能。低功耗自适应分层型协议(LEACH)算法^[15]在选举簇首时能保证网络中节点具有相同的竞争概率,但该算法没有考虑当前簇首节点的能量,距离长机较远的簇首节点会因长距离发送数据过早耗尽自身能量而死亡,造成网络分割,影响网络的生命周期。Yu 等^[16]针对传统聚类算法不能适应高度动态的大型自组网问题,提出了一种移动预测下的动态分簇算法,但该算法忽略了节点能量对网络生命周期的影响。Wu 等^[17]考虑了节点的剩余能量并提出了一种能适应能量变化的分簇路由协议,先根据节点

分布生成大小均匀的簇,在选举簇首时构造了一个优先级函数,但该算法没有分析簇间通信的过程。赵大飞等^[18-19]将无线紫外光通信应用于无人机网络中,改进了传统分簇算法的簇首选举过程,实现了无人机节点的能耗均衡,但该算法中簇首节点直接将数据发送给长机,簇间通信的连通性较差。针对无人机网络的能量消耗,Bhandari 等^[20]提出了一种基于位置的 K-means 无人机聚类算法,将无人机的机动性和位置相结合,推导出簇首最大覆盖概率与簇大小的关系,通过找到最优簇减小网络开销。相比传统的聚类算法,该算法能提高有限资源下无人机网络的性能与可靠性,降低网络的延迟。

综上所述,为了均衡无人机编队在数据传输时能量消耗的差异,延长无人机编队的留空时间,本文提出了一种紫外光通信协作下基于最优刚性图的无人机编队分簇优化(COAORG)算法。首先,建立了机间紫外光通信链路模型和能量消耗模型;然后,在此基础上对 LEACH 分簇算法的簇首选举和簇间通信过程进行改进,在提高网络连通性的同时均衡了节点间的通信能耗。

2 基础理论与通信模型

2.1 最优刚性图

在一个图中如果限制部分边的长度,整个图的结构不会发生改变,则称该图为刚性图,否则将其称为可变形图。刚性图是一种无向图,图中任意一对节点间的规定距离在连续位移内都保持不变,即某个顶点的运动不会破坏整个图的形状^[12]。设编队中第 i 架无人机的运动轨迹为 f_i ,第 j 架无人机的运动轨迹为 f_j ,若对于任意时刻 t , $f_i(t)$ 和 $f_j(t)$ 间的距离都是一个常数,则整个编队的轨迹为刚性轨迹。假设二维空间中有一个由 4 个顶点构成的框架,如图 1 所示。图 1(a)中,节点 4 可围绕节点 3 做圆周运动,导致节点 4 与节点 1 对应运动轨迹间的距离发生变化,表明该图为可变形图。图 1(b)中,限制部分边的长度后,节点的运动不会导致整个图的结构发生变化,即当某个节点任意运动时,图中所有节点之间的距离都是一个常数,表明该图为刚性图。最小刚性图是在保持刚性的前提下拥有通信链路数最少的刚性图,如图 1(c)所示。

最优刚性图是对最小刚性图每条边加权后得到的,如果一个无向图为最小刚性图且各边加权和是所有相同顶点构成的图中最小的^[21],则称该拓扑图为最优刚性图。最优刚性图构建的通信拓扑不仅具有最低的通信复杂度,且能保证最小的通信链路权值。通常采用建立刚度矩阵的方法构建最优刚性图,假设在 r 维空间中有 n 个顶点组成的图,顶点的位置坐标为 (p_1^i, \dots, p_r^i) 。在建立刚度矩阵时:首先,将这些顶点按 $\{(p_1^1, \dots, p_r^1), \dots, (p_1^n, \dots, p_r^n)\}$ 排列;然后,建立一个矩

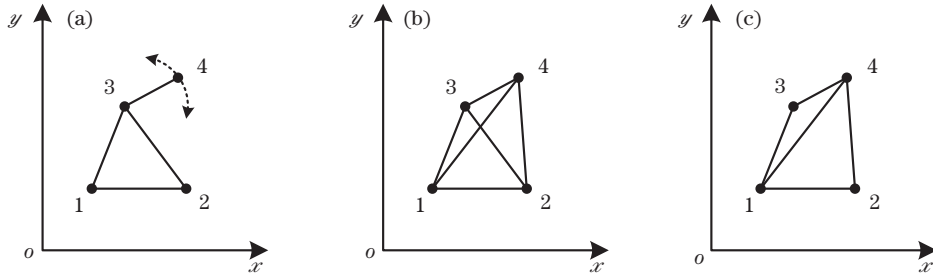


图 1 刚性图与可变形图。(a)可变形图；(b)刚性图；(c)最小刚性图

Fig. 1 Rigid and deformable graphs. (a) Deformable graph; (b) rigid graph; (c) minimum rigid graph

阵 M , M 的行与列分别对应图中边和顶点的坐标。以二维空间为例,若一个图中第 l 条边 (i, j) 对应于刚性矩阵 M 中第 l 行元素组成的行向量 A_l , 则 A_l 可表示为

$$A_l = [0, \dots, p_i^1 - p_j^1, p_i^2 - p_j^2, \dots, p_j^1 - p_i^1, p_j^2 - p_i^2]. \quad (1)$$

2.2 机间紫外光通信链路模型

紫外光在通信过程中光信号能量会发生衰减^[22], 衰减的能量一部分被吸收转换为其他形式的能量, 另一部分光波经大气散射后会偏离原来的传播方向, 但载有的原始信息不会发生改变。紫外光的单次散射链路模型如图 2 所示。其中, T_x, R_x 分别为通信链路的收发端, β_1, β_2 分别为发送仰角和接收仰角, θ_1, θ_2 分别为发散半角和接收视场半角, r_D 为收发端的距离, V 为有效散射体, P 为散射点, θ_s 为散射角, r_1 为 T_x 到 V 之间的距离, r_2 为 V 到 R_x 之间的距离。

在初始时刻, 发射端 T_x 沿着发射角 β_1 的方向发射出能量为 E_t 的紫外光束, 光信号经过散射后到达有效散射体内。根据散射信道模型相关理论, 可将 δV 看作公共散射体内的体积元, 经 δV 的光子被散射传输至接收端, 此时接收端单位面积上的能量^[23-24]可表示为

$$\delta E_r = \frac{E_t k_s P(\mu) A_r \delta V \cos(\zeta) \exp[-k_e(r_1 + r_2)]}{4\pi\Omega_t r_1^2 r_2^2}, \quad (2)$$

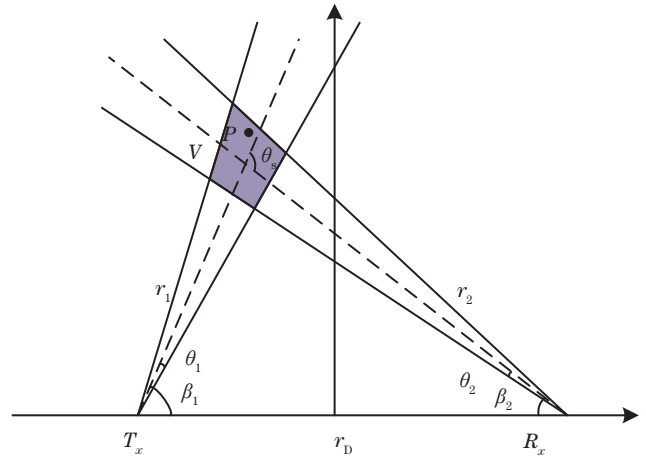


图 2 紫外光的单次散射链路模型

Fig. 2 Single scattering link model of ultraviolet light

式中, k_s 和 k_e 分别为大气散射系数和消光系数, $P(\mu)$ 为散射相函数, $\mu = \cos \theta_s$, A_r 为接收孔径的面积, ζ 为接收装置到体积元 δV 之间的向量与接收视场角轴线的夹角, Ω_t 为发射端发射光束的立体角。

接收端接收的总能量 E_r 可通过对 δE_r 积分得到, 路径损耗可表示为 E_t 与 E_r 的比值, 采用文献[24]中的单次散射信道模型时, 路径损耗可简化为

$$L = \frac{E_t}{E_r} \approx \frac{12r \sin \beta_1 \sin^2 \beta_2 (1 - \cos \theta_1) \exp[k_e r (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) / \sin \theta_s]}{k_s P(\mu) A_r \theta_1^2 \theta_2 \sin \theta_s (12 \sin^2 \beta_2 + 4\theta_2^2 \sin^2 \beta_1)}. \quad (3)$$

2.3 能量消耗模型

机间采用的紫外光通信系统能量消耗模型如图 3 所示。无人机对周围环境进行持续感知, 并将采集到的数据发送到信号调制模块, 数据经高速调制后由发送端的紫外 LED 驱动电路发射出去。载有信息的紫外光波在大气中传输时受到散射作用到达接收端, 被紫外探测器或光电倍增管接收, 信号经过解调恢复为原始的数据、语音或图像。

当编队中的两架无人机进行数据传输时, 节点消耗的能量由发送数据能耗 E_T 、接收数据能耗 E_R 和融合数据能耗 E_M 三部分组成。

传输单位比特数据在路径 L 上的能耗 E_L ^[18]可表示为

$$E_L = E_T (1 - 1/L), \quad (4)$$

式中, E_T 为发送端发送单位比特数据消耗的能量。无人机在接收端接收数据消耗的能量可表示为

$$E_R(k, d) = k E_R, \quad (5)$$

式中, E_R 为接收端接收单位比特数据消耗的能量, d 为节点间的距离, k 为发送数据的比特数。此外, 同一个簇内相邻节点收集到的数据冗余较大, 簇首无人机会将这些数据进行融合后再发送给长机。数据融合时消耗的能量可表示为

$$E_M(k, d) = k(M + 1) E_M, \quad (6)$$

式中, E_M 为簇首融合单位比特数据消耗的能量, M 为簇内的成员个数。

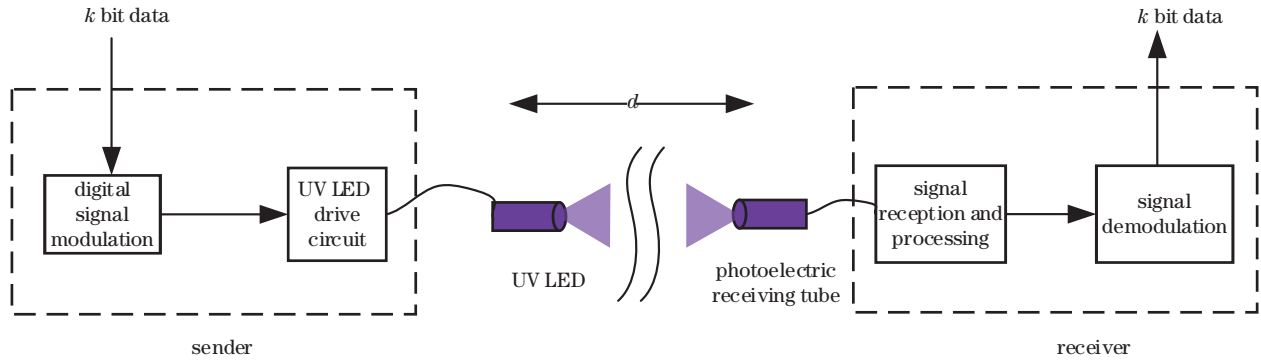


图 3 机间紫外光通信能量消耗模型

Fig. 3 Energy consumption model of inter-machine ultraviolet communication

3 COAORG 算法

3.1 无人机编队分簇网络模型

无人机编队分簇网络模型由长机、簇首僚机和成员僚机组成,如图 4 所示。无人机利用搭载的紫外光通信装置进行信息传输。假设无人机节点的初始能量相同且都有自己的 ID 标识号,即编队中的僚机节点地位相等且具有相同的资源配置,除长机外的其余僚机都可以竞争选举簇首。整个编队采用“长机-僚机”的

方式飞行。无人机在集结时从初始位置到达指定的目标位置后,编队的队形不再发生变化,此时,所有节点具有相同的飞行方向和速度,即机间保持相对静止。当无人机编队处于队形保持状态时,针对节点数目较多且不易集中管理的问题,采用分簇的拓扑管理机制可以简化网络的结构。在一个集群内部依据相应的算法原理选举若干个簇首,负责收集和融合簇内的数据并与长机通信交流。成员节点则对周围的信息进行侦察,并将数据发送给簇首节点。

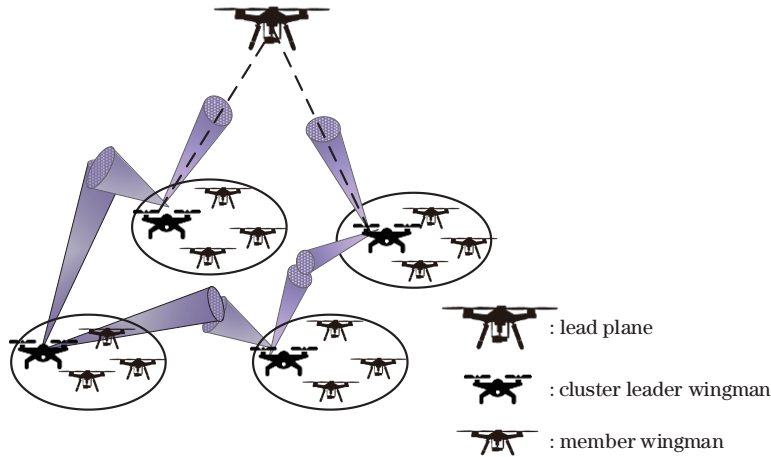


图 4 UAV 编队分簇模型

Fig. 4 Clustering model of the UAV formation

3.2 算法思想

LEACH 算法中簇首的选举是随机的,在传输数据过程中可能会造成节点能量的过度消耗,且当某个簇首节点发生故障时,整个簇内的数据都会丢失,簇间通信的连通性较差。针对 LEACH 算法的不足,提出了 COAORG 算法,该算法采用周期性循环的方式,每轮循环包括簇的生成、最优刚性图的生成和数据稳定传输三个阶段。

1) 簇的生成阶段

LEACH 算法在选举簇首时,保证了所有僚机节点都有相同的竞争概率。选举时,节点在 $0 \sim 1$ 之间产生一个随机数作为标志位,然后将该标志位与阈值门

限 $T(n)$ 进行对比,若小于 $T(n)$,则将对应节点作为本轮的簇首并广播自己是簇首的信息。 $T(n)$ 可表示为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p_{opt}}{1 - p_{opt}(R \bmod 1/P_{opt})}, & n \in G \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_{opt} 为网络在初始设定时簇首节点所占的期望比例, R 为轮数, G 为在最近 $1/p_{opt}$ 轮中没有当选为簇首的集合。

在数据传输时,簇首节点的能耗要大于普通节点,所以编队网络每轮的能耗状况和簇首节点的分布有很大关系,当选的簇首节点距离长机太远时,链路的可靠性会降低且能量消耗加快。COAORG 算法对簇首

的选举概率进行改进,考虑每轮中无人机自身的剩余能量和与长机通信时链路的可靠性,用路径损耗衡量某条链路的可靠性。改进后的簇首选举概率 P_i 可表示为

$$P_i = P \cdot \left[\omega \cdot \frac{E_i(R)}{E(R)} + (1 - \omega) \cdot \frac{1}{X_{\text{loss}}} \right], \quad (8)$$

式中, ω 为权重因子, $E_i(R)$ 为节点 i 在第 R 轮中的剩余能量, $E(R)$ 为第 R 轮中所有存活节点的平均剩余能量, X_{loss} 为节点与长机间通信时链路的路径损耗。可以发现,无人机节点的剩余能量越大,其与长机通信时的链路越可靠,该节点当选为簇首的概率就越大。

当网络的初始总能量为 E_{total} , 网络生存期为 R_{max} 时,第 R 轮中网络的平均剩余能量为

$$\overline{E(R)} = \frac{1}{n} E_{\text{total}} (1 - R/R_{\text{max}}), \quad (9)$$

表 1 最优刚性图的生成过程

Table 1 Generation process of optimal rigid graph

Algorithm 1: generate the optimal rigidity graph between cluster heads	
Input: location of the cluster head node p , number of cluster head nodes n , maximum UV LED communication radius R	
Output: final set of communication links, the final UV LED communication radius communication radius	
1	calculate the weight of communication links between all cluster head nodes
2	all links are listed in ascending order by weight
3	stiffness matrix is established according to the sorting results \mathbf{M}
4	initialize \mathbf{M}' , that is $\mathbf{M}' = \mathbf{M}(\mathbf{1})$
5	for 1: $n(n-1)/2$ search all links
6	while $\text{rank}(\mathbf{M}') \leq 2n - 3$
7	add the next row of \mathbf{M} to \mathbf{M}' form a new matrix \mathbf{M}_j
8	if \mathbf{M}_j is nonsingular
9	$\mathbf{M}' = \mathbf{M}_j$
10	record the link corresponding to the row
11	else delete the row
12	end
13	end
14	end

3) 数据传输阶段

完成上述工作后,开始进行数据传输。簇内成员节点和簇首节点间的距离较小,因此采用单跳路由的方式直接进行数据传输。成员节点持续感知周围的信息,并在指定的时隙内将收集到的数据发送给簇首,簇首将融合后的数据发送给长机。设距离阈值为 d_{th} :若簇首与长机间的距离 $d \leq d_{\text{th}}$,直接将数据传输给长机;若 $d > d_{\text{th}}$,则选择权值最大的邻居簇首进行数据转发。权重因子可表示为

$$\omega = \frac{E_j}{E_o} \times \frac{1}{d_{ij}}, \quad (11)$$

式中, E_j 为邻居簇首节点的剩余能量, E_o 为节点的初始能量, d_{ij} 为两节点间的距离。

此时,改进后的簇首选举门限为

$$T_i(n) = \begin{cases} \frac{P_i}{1 - P_i(R \bmod 1/P_{\text{opt}})}, & n \in G \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

该阶段结束后,当选簇首的僚机向整个编队广播消息,成员僚机通过接收到的信号强度选取与其距离最近的簇群加入。

2) 最优刚性图的生成阶段

簇的生成阶段结束后,网络被划分为大小不均匀的簇,在簇首间生成最优刚性图。将紫外光通信时的路径损耗设为链路权值,拓扑构建时优先选择链路权值较小的通信链路,保证了节点间数据传输的可靠性。优化后的拓扑结构使每个簇首都至少有两个邻居节点与其进行通信,提高了网络的容错性。表 1 为该阶段的具体执行过程。

4 仿真结果与分析

对 COAORG 算法的性能进行仿真验证,仿真区域设为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$,节点数量为 100。为了增加发射功率,部署 LED 阵列作为光源,采用二进制振幅键控(OOK)方式进行调制,数据传输速率设为 10 kbit/s。仿真时设置的部分参数如表 2 所示。

LEACH 算法和 COAORG 算法的通信链路如图 5 所示。其中,五角星表示长机,实心圆点表示簇首无人机节点,空心圆点表示成员无人机节点,连线表示无人机间的通信链路。从图 5(a)可以发现,LEACH 算法中每个簇首无人机节点直接与长机通信,距离长机较远的簇首无人机节点通信链路的可靠性较低。从图 5(b)

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter setting

Parameter	Numerical value
Number of nodes n	100
Node initial energy E_0/J	300
Send the energy consumption $E_T/\mu J$	80
Receive the energy consumption $E_R/\mu J$	80
Fusion energy consumption $E_{DA}/\mu J$	8
$\beta_T, \beta_R/(\circ)$	40
$\theta_T, \theta_R/(\circ)$	15
Weight coefficient	0.5

可以发现,GOAORG 算法经最优刚性图优化后生成的通信链路图,每个簇首无人机节点都至少与两个相邻

无人机节点相连,网络的容错性较高。

4.1 算法的对比分析

仿真对比了 LEACH 算法、LEAORG 算法、LEACOA 算法、COAORG 算法优化后的网络性能指标,其中,LEAORG 表示仅对簇间通信进行优化得到的结果,LEACOA 表示仅对簇首选举概率进行优化得到的结果。从图 6(a)、图 6(b)可以发现,经 COAORG 算法优化后的存活节点数和剩余能量均优于其他三种算法,有效延长了无人机网络的生存时间,节省了无人机编队网络间的能量消耗。原因是:进行数据传输时,LEACH 算法由于簇首选举位置过偏加速了节点能量的消耗;LEAORG 算法没有考虑到簇首选举时节点剩

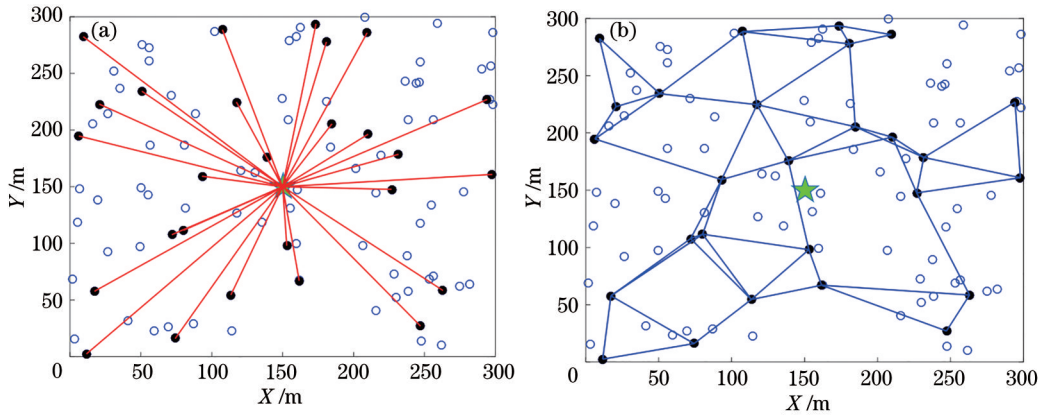


图 5 不同算法的通信链路图。(a) LEACH 算法;(b) COAORG 算法

Fig. 5 Communication link graph of different algorithms. (a) LEACH algorithm; (b) COAORG algorithm

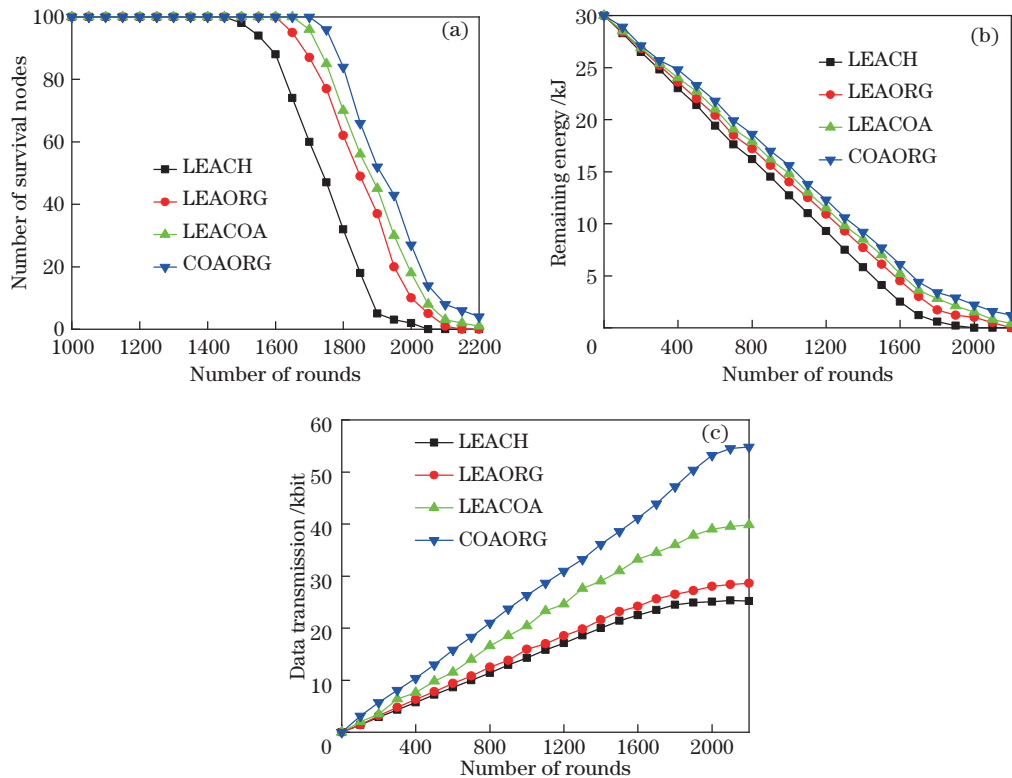


图 6 不同算法性能对比。(a) 存活节点数;(b) 剩余能量;(c) 数据传输量

Fig. 6 Comparison of performance of different algorithms. (a) Number of survival nodes; (b) remaining energy; (c) data transfer amount

余能量的影响,导致网络负载的均衡性较差;LEACOA算法没有考虑簇间的通信优化,导致距离长机较远的节点过度消耗能量。从图 6(c)可以发现,COAORG算法的数据传输量明显高于其他三种算法。分析可知,COAORG算法中簇首的当选概率能动态适应节点能量的变化,网络中节点的能耗差异小,网络的生存时间得到了延长,从而增加了长机接收到的数据量。

可通过第一个节点死亡的时间判断网络的性能,图 7 为第一个节点死亡时的循环数。可以发现,不同区域面积对网络第一次出现节点死亡现象的影响不同。在 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的区域面积内,LEACH算法、LEAORG算法、LEACOA算法和 COAORG算法第一次出现死亡节点时的循环次数分别为 1451、1697、1750 和 1817,COAORG算法第一次出现死亡节点的时间比 LEACH算法、LEAORG算法和 LEACOA算法分别延缓了 25.2%、7.1% 和 3.8%。在 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 的区域面积内,COAORG算法第一次出现死亡

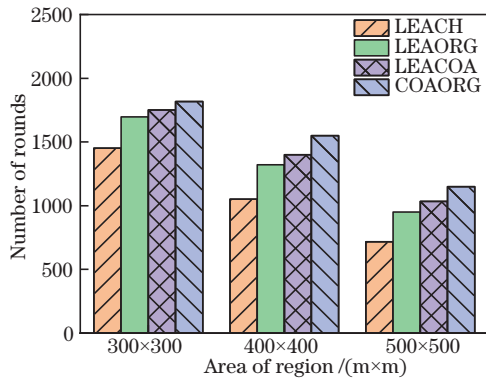
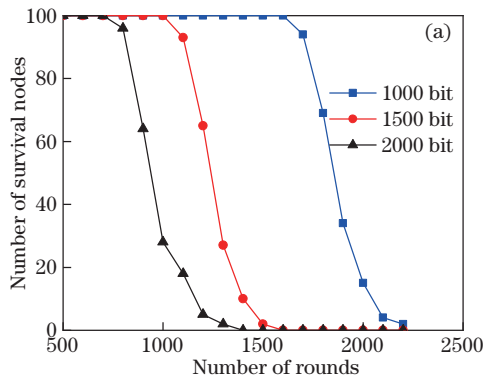


图 7 第一个节点死亡时的循环数

Fig. 7 Number of cycles when the first node dies

节点的时间比 LEACH算法、LEAORG算法和 LEACOA算法分别延缓了 47.3%、17.4% 和 10.7%。在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的区域面积内,COAORG算法第一次出现死亡节点的时间比 LEACH算法、LEAORG算法和 LEACOA算法分别延缓了 60.3%、21.1% 和



11.0%。综上所述,COAORG算法延长了第一个节点死亡的时间,随着区域面积的增大,COAORG算法在网络性能方面比其他三种算法的优势更加明显。

可通过第一个节点、一半节点、最后一个节点的死亡时间衡量网络中的能耗均衡程度,图 8 为不变通网络的生存期。可以发现:LEACH算法、LEAORG算法、LEACOA算法和 COAORG算法第一次出现死亡节点时的循环次数分别为 1451、1697、1750 和 1817;LEACH算法、LEAORG算法、LEACOA算法和 COAORG算法出现一半节点死亡的循环次数分别为 1749、1951、2030 和 2123;LEACH算法、LEAORG算法、LEACOA算法和 COAORG算法最后一个节点死亡的循环次数分别为 2126、2245、2340 和 2475。相比变化最大的 LEACH算法,本算法第一次出现死亡节点和出现一半死亡节点的时间分别延长了 25.2% 和 21.4%。综上所述,COAORG算法在能耗均衡程度上均优于其他三种算法。

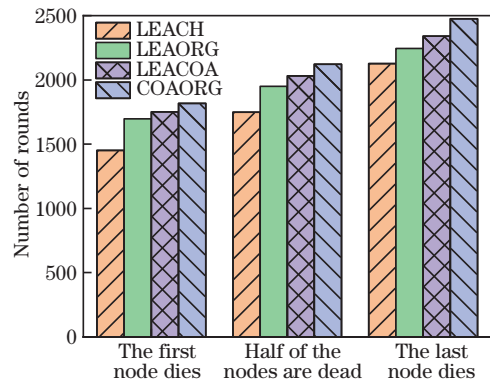


图 8 网络生存期的对比

Fig. 8 Comparison of network lifetime

4.2 算法的性能分析

图 9 为 COAORG 算法中不同数据包长度对网络存活节点数和网络剩余能量的影响。从图 9(a)可以发现,在相同的循环轮数下,随着数据包长度的增加,网络的存活节点数逐渐减少,且数据包的长度越大,第一个节点死亡和最后一个节点死亡的时间越早。从

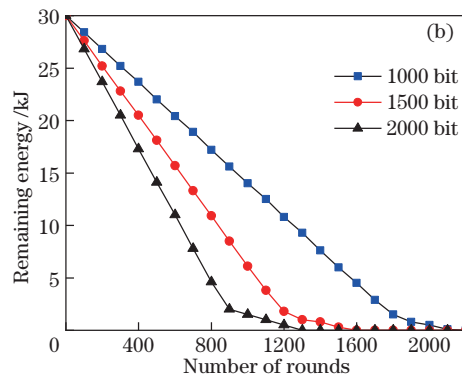


图 9 COAORG 算法性能。(a) 存活节点; (b) 剩余能量

Fig. 9 COAORG algorithm performance. (a) Survival nodes; (b) remaining energy

图 9(b) 可以发现, 在相同的循环轮数下, 随着数据包长度的增加, 网络的剩余能量逐渐减少, 且数据包的长度越大, 网络剩余能量的衰减越快。分析可知, 随着数据包长度的增加, 节点间数据发送、数据接收、数据融合时消耗的能量增加, 导致节点能量快速耗尽。

图 10 为 COAORG 算法在不同区域面积下三组不同数据包长度对网络第一次出现节点死亡现象的影响。可以发现, 在 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 区域面积内, 1000 bit、1500 bit 和 2000 bit 的数据包长度对应第一个节点死亡的循环次数分别为 1817、1089 和 707, 这表明区域面积一定时, 随着数据包长度的增加, 出现第一个节点死亡的轮数越小, 即数据包长度的增加会加快第一个节点死亡的时间。当数据包长度为 1000 bit 时, $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 、 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 、 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的区域面积对应第一个死亡节点的循环次数分别为 1817、1550、1150。分析可知, 数据包长度一定时, 区域面积增大会加快节点死亡时间。原因是随着区域面积的增大, 网络中节点的密度变小, 节点间的通信距离增大, 进而导致通信时产生更大的通信能耗。

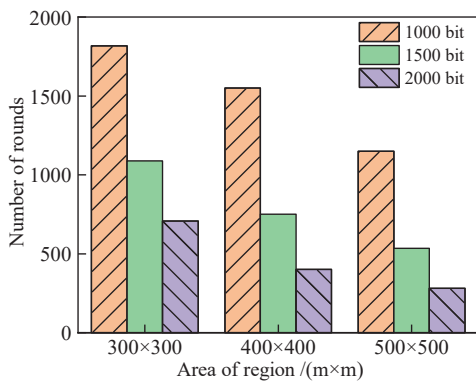


图 10 不同数据包长度下的第一个节点死亡时间

Fig. 10 Time of death of the first node at different packet length

图 11 为 COAORG 算法中不同数据包长度对网络生存周期的影响。可以发现: 当数据包长度为 1000 bit 时, 第一个节点死亡、一半节点死亡、全部节点死亡的循环次数分别为 1817、2123、2475; 当数据包长度为

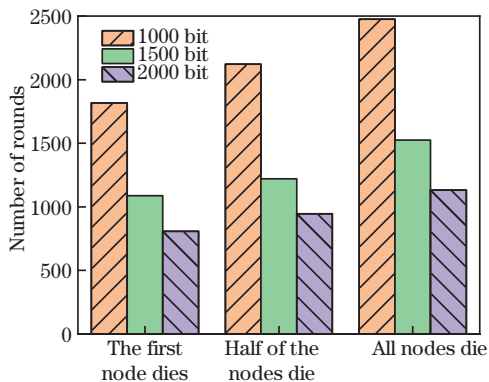


图 11 不同数据包长度的网络生存期

Fig. 11 Network lifetime of different packet lengths

1500 bit 时, 第一个节点死亡、一半节点死亡、全部节点死亡的循环次数分别为 1080、1220、1524, 相比 1000 bit 的数据包长度, 三个关键节点的死亡时间分别缩短了 40.6%、42.5% 和 38.4%; 当数据包长度为 2000 bit 时, 第一个节点死亡、一半节点死亡、全部节点死亡的循环次数分别为 816、923、1138, 相比 1000 bit 的数据包长度, 三个关键节点的死亡时间分别缩短了 55.1%、56.5% 和 54.0%。综上所述, 数据包长度的增加时, 三个关键节点的死亡时间会提前, 进而影响网络的生存周期。

5 结 论

考虑到复杂战场环境下无人机编队对通信网络的隐秘性需求, 利用无线紫外光通信技术, 将其应用于无人机编队中, 在建立机间紫外光通信模型和能量消耗模型的基础上, 提出了一种紫外光通信协作下基于最优刚性图的无人机编队分簇优化算法。该算法对无人机编队分簇过程中的簇首选举和簇间通信进行了改进, 减小了簇首节点与成员节点间的能耗差异, 簇首间通过生成最优刚性图提高簇间通信的连通性。结果表明, 改进算法使网络的性能指标得到了有效改善, 延缓了网络出现节点死亡的现象, 均衡了无人机编队内的能量消耗, 为无人机执行任务延长了更多的时间, 提高了集群编队协同作战的效率。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 吴平, 唐文照. 无人机集群数据链组网技术研究[J]. 空间电子技术, 2012, 9(3): 61-64.
Wu P, Tang W Z. The study of UAV flock network datalink[J]. Space Electronic Technology, 2012, 9(3): 61-64.
- [3] 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.
- [4] 李霁野, 邱柯妮. 紫外光通信在军事通信系统中的应用[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(4): 19-21.
Li J Y, Qiu K N. Military application of UV communication[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(4): 19-21.
- [5] Sun Y, Gong C, Xu Z Y, et al. Link gain and pulse width broadening evaluation of non-line-of-sight optical wireless scattering communication over broad spectra[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-12.
- [6] Qin H, Zuo Y, Li F Y, et al. Noncoplanar geometry for mobile NLOS MIMO ultraviolet communication with linear complexity signal detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 7906012.

- [7] 王卫宁. 三维无人机编队队形重构与队形保持控制算法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018: 20-28.
Wang W N. Research on formation reconfiguration and formationkeeping control algorithm for three dimensional unmanned aerial vehicles[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018: 20-28.
- [8] Hendrickx J M, Fidan B, Yu C B, et al. Formation reorganization by primitive operations on directed graphs [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(4): 968-979.
- [9] 史浩宇. 多旋翼飞行器的三维时变编队量化控制[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(9): 122-128.
Shi H Y. Quantitative control of three-dimensional time-varying formation for multi-rotor aircraft[J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(9): 122-128.
- [10] 张佳龙, 闫建国, 张普. 基于反步推演法的多机编队队形重构控制[J]. *航空学报*, 2019, 40(11): 323177.
Zhang J L, Yan J G, Zhang P. Multi-UAV formation forming reconfiguration control based on back-stepping method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(11): 323177.
- [11] Luo X Y, Li S B, Guan X P. Automatic generation of min-weighted persistent formations[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(8): 3104-3114.
- [12] Ren R, Zhang Y Y, Luo X Y, et al. Automatic generation of optimally rigid formations using decentralized methods[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2010, 7(4): 557-564.
- [13] 方斌, 陈特放. 基于刚性图的多智能体编队控制研究[J]. *控制工程*, 2014, 21(2): 178-181, 188.
Fang B, Chen T F. Research of control of multi-agent formation based on rigid graph[J]. *Control Engineering of China*, 2014, 21(2): 178-181, 188.
- [14] Fan Q J, Wang F X, Shen X Q, et al. Path planning for a reconnaissance UAV in uncertain environment[C]// 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation, June 1-3, 2016, Kathmandu, Nepal. New York: IEEE Press, 2016: 248-252.
- [15] Zeng Y, Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [16] Yu Y L, Ru L, Fang K, et al. Comprehensive mobility prediction based clustering algorithm for ad hoc UAV networks[C]// Proceedings of the 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology, Advances in Engineering Research, January 23-24, 2016, Hangzhou, China. Paris: Atlantis Press, 2016: 601-614.
- [17] Wu W L, Xiong N X, Wu C X. Improved clustering algorithm based on energy consumption in wireless sensor networks[J]. *IET Networks*, 2017, 6(3): 47-53.
- [18] 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.
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.
- [19] 赵太飞, 林亚茹, 马倩文, 等. 无人机编队中无线紫外光隐秘通信的能耗均衡算法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(12): 2969-2975.
Zhao T F, Lin Y R, Ma Q W, et al. Energy balance algorithm for wireless ultraviolet secret communication in UAV formation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(12): 2969-2975.
- [20] Bhandari S, Wang X B, Lee R. Mobility and location-aware stable clustering scheme for UAV networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 106364-106372.
- [21] 王金然, 罗小元, 杨帆, 等. 三维最优持久编队拓扑生成策略[J]. *自动化学报*, 2015, 41(6): 1123-1130.
Wang J R, Luo X Y, Yang F, et al. Generation strategy of optimal persistent formation topology in 3D space[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(6): 1123-1130.
- [22] Zhang S H, Wang J Y, Xu Z Y, et al. Attenuation analysis of long-haul NLOS atmospheric optical scattering communication[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 80: 51-55.
- [23] Zuo Y, Xiao H F, Wu J, et al. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10359-10369.
- [24] Xu Z Y, Ding H P, Sadler B M, et al. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1860-1862.