

# 激光与光电子学进展

## 紫外光通信协作无人机最优刚性编队生成算法

赵太飞<sup>1,2\*</sup>, 曹丹丹<sup>1</sup>, 马倩文<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** 稳定的编队通信网络能提高无人机(UAV)集群执行任务的能力,因此需要为编队设计一个信息交互拓扑,使无人机在保持编队队形的同时通信代价最小。针对无人机编队网络的拓扑优化问题,结合紫外光通信的优点,提出一种基于紫外光通信的无人机最优刚性编队生成算法。在分析机间紫外光通信链路模型的基础上,利用紫外半球形LED阵列协助无人机发现自身的邻居节点,首先生成最优刚性子图,再通过删除链路得到最优刚性编队图。仿真结果表明,与其他算法相比,所提算法构建的拓扑结构具有合适的平均节点度和较小的通信半径,提高了网络的容错性能,有效减小了编队的通信复杂度,降低了网络能量消耗。

**关键词** 光通信; 紫外光通信; 最优刚性图; 无人机编队; 拓扑控制

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0506001

### Optimally Rigid Formation Generation Algorithm Based on Ultraviolet Optical Communication for UAVs

Zhao Taifei<sup>1,2\*</sup>, Cao Dandan<sup>1</sup>, Ma Qianwen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty 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** A stable formation communication network can improve the ability for UAV clusters to perform tasks. Therefore, it is necessary to design an information interaction topology that maintains the formation and minimizes communication costs. This research is aimed at optimizing the topology of a UAV formation network by integrating the benefits of ultraviolet optical communication. Thus an optimally rigid formation generation algorithm for UAVs based on ultraviolet communication is proposed. In analyzing the ultraviolet communication link model between UAVs, an ultraviolet hemispherical LED array is used to assist the UAVs in finding their neighbor nodes. This is achieved by first generating an optimal rigid subgraph and then forming an optimal rigid formation graph through the link deletion. Simulation results show that when compared to other algorithms, the proposed algorithm constructs a topology with both an appropriate average node degree and a small communication radius. The proposed algorithm improves the fault tolerance performance of the network, reduces communication complexity and decreases energy consumption of the formation network.

**Key words** optical communications; ultraviolet optical communication; optimally rigid graph; UAV formation; topology control

**OCIS codes** 060.4510; 060.4250; 060.4256

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-07-20; 录用日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省教育厅科研计划(17-JF024)、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))

\*E-mail: zhaotaifei@163.com

## 1 引言

由于军事作战要求的增加和社会发展特定的需要,编队应用引起了广泛研究。相对于单无人机(UAV),无人机编队飞行在载荷量、探测视野、多任务执行等方面呈现出巨大优势。可靠的通信网络能提高无人机编队协同合作的能力,实现信息实时共享,但无人机在飞行过程中可能会面对强电磁干扰、复杂的大气环境<sup>[1]</sup>,因此需要采用一种能抵抗外界干扰的通信方式。无线紫外光通信具有强抗干扰能力、全天候工作、低功耗、易于机载等优点<sup>[2]</sup>,能为无人机编队在强电磁干扰环境中顺利执行任务提供有效保障。目前紫外光技术已被应用在军事和民事领域中,如空间探测、军事通信及火灾探测等<sup>[3]</sup>。文献[4]结合紫外光通信的优点,提出了一种无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法。文献[5]根据紫外光通信的特点,将紫外光技术应用于直升机降落过程,利用LED阵列结构实现对直升机降落区域的引导。

拓扑控制的目的是在保证网络连通的条件下,为节点选择合适的逻辑邻居节点进行通信,进而降低节点的传输功率。大规模通信网络中常使用分布式拓扑控制算法,因为它只依赖于局部信息的获取,典型的算法有RNG<sup>[6]</sup>、GG<sup>[7]</sup>、LMST<sup>[8]</sup>等,都使网络的生存期得到了延长。无人机的编队控制是指一种多架无人机在执行任务时为了更好地融入态势环境,通过彼此间的信息交互保持编队几何构型的控制技术。文献[9]提出了一种多智能体自主编队控制算法,该算法通过同时获得期望的智能体间距离和邻居序列,最终收敛到期望的编队队形。文献[10]将分布式控制方法应用于无人机队形保持研究中,并基于弹性距离矢量建立了长机与僚机之间的误差控制模型,仿真了三架无人机编队的三维队形保持与控制。

目前,图论知识也被普遍应用于编队的控制研究中。文献[11]提出了一种局部拓扑控制算法,该算法指定连接点作为发起者,并构建最小生成树,在保持网络连接的同时实现了节能。文献[12]基于紫外光非直视通信方式建立了分簇式无人机通信网络模型,该模型采用多信道通信,有效改善了机间定向通信时的“耳聋”问题。文献[13]研究了一种分布式边缘删除算法,该算法能够构造出具有最低刚性的图形。文献[14]提出了一种生成最小

加权刚性图和最小加权持久图的方法,但该方法是集权式的,必须要知道编队中所有智能体的信息,不适用于大规模编队。文献[15]提出了一种生成最优刚性图的分布式算法,但此算法是基于二维空间的,且假设每架无人机的邻居节点是已知的。

本文考虑紫外光通信的优势,将紫外半球形LED阵列应用于无人机编队中,提出一种三维空间内紫外光协助无人机生成最优刚性编队(UVORF)算法。该算法利用紫外半球形LED阵列协助无人机发现自身的邻居节点,在此基础上以紫外光通信路径损耗作为链路权值,优先选择路径损耗较小的可靠链路构建最优刚性拓扑,所构建的编队网络具有复杂度低、鲁棒性强及能保持编队队形的优势。

## 2 网络模型与基础理论

### 2.1 编队网络模型

编队的网络拓扑可用无向图  $G = \{V, E, W, P\}$  表示,其中节点集  $V = \{v_i\}$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $v_i$  表示编队中的无人机;边集合  $E = \{e_{ij}\} \subset V \times V$ ,  $1 \leq i, j \leq n$ ,  $e_{ij}$  表示  $v_i$  与  $v_j$  之间的通信链路;边权重集合  $W = \{w(e_{ij})\}$ ,  $e_{ij} \in E$ ,  $w(e_{ij})$  表示链路  $e_{ij}$  的通信代价;位置集合  $P = \{p_i\}$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $p_i$  表示无人机在编队中所处的位置。在分布式无人机集群控制技术中,一架无人机只需要知道相邻几架无人机的位置和状态,就能保持整个编队状态的一致性。若无人机  $v_j$  在无人机  $v_i$  的最大通信范围内,即两者能相互通信,称它们互为邻居。如图1所示,  $R$  表示编队中两架无人机相互影响的范围,无人机  $v_i$  的空间邻域集可用一个半径为  $R$  的球描述,表达式为

$$N_i = \{v_j \in V: \|p_j - p_i\| < R\}。 \quad (1)$$

### 2.2 最优刚性图

在一个图中,如果限制部分边的长度,整个图

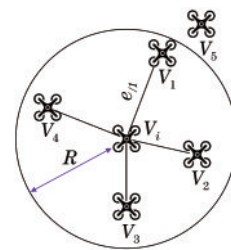


图1 无人机编队网络模型

Fig. 1 Formation network model of UAV

的结构不会发生改变,则称该图为刚性图,否则称为可变性图。无人机编队中,设  $p_i(t)$  代表第  $i$  个无人机在  $t$  时刻的运动轨迹,如果  $\forall (i, j) \in E$  满足  $\|p_i(t) - p_j(t)\|$  为常数的要求,则这个编队拓扑结构是刚性图,编队的队形是被保持的<sup>[16]</sup>。刚性图通常由刚度矩阵来构造,在  $r$  维空间中,首先对各顶点坐标按顺序进行排列,  $\{(p_1^1, p_1^2, \dots, p_1^r), (p_2^1, p_2^2, \dots, p_2^r), \dots, (p_n^1, p_n^2, \dots, p_n^r)\}$ , 然后建立一个矩阵  $\bar{M}$ , 矩阵的行与列分别对应图中边和顶点的坐标。以三维空间为例,若一个图中第  $k$  条边  $(i, j)$  对应刚性矩阵  $\bar{M}$  中第  $k$  行元素组成的行向量为  $A_k$ , 则  $A_k$  的表达式为

$$A_k = [0 \dots p_i^1 - p_j^1 \ p_i^2 - p_j^2 \ p_i^3 - p_j^3 \ \dots \ p_j^1 - p_i^1 \ p_j^2 - p_i^2 \ p_j^3 - p_i^3 \ \dots \ p_i^2 \ p_j^3 - p_i^3 \ p_j^2] \quad (2)$$

最小刚性图是一类具有最少通信链路数的刚性图,对最小刚性图每条边进行加权,可得到最优刚性图。如果一个无向图满足<sup>[16]</sup>: 对应的图为最小刚性图;各边加权和是所有由相同顶点构成的刚性图中最小的,则称该拓扑图为最优刚性图。由此可知,最优刚性图不仅是通信复杂度最小的刚性图,而且保证了最小的通信链路权值。图 2 为三维空间中由四个顶点构成的可变性图和刚性图。

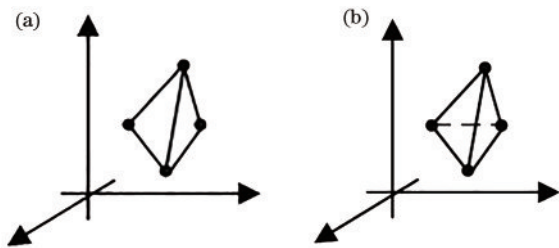


图 2 可变性和刚性架构。(a) 可变性图; (b) 刚性图  
Fig. 2 Flexible and rigid frameworks. (a) Flexible graph; (b) rigid graph

### 3 机间紫外光通信链路模型

紫外光通信是一种以紫外光作为载体进行信息传递的通信方式。紫外光在低空大气中具有强烈散射作用,因此紫外光通信不仅可实现直视(LOS)通信,也可实现非直视(NLOS)通信。LOS 通信指发射机在接收机的视场内,要求收发端之间无障碍物;NLOS 通信主要是利用紫外光在大气传输过程中的散射特性实现的,根据收发端仰角的不同,分为 NLOS(a)、NLOS(b)、NLOS(c) 三种通信方式。

为使无人机能发现通信范围内的所有邻居节

点,在它的顶部和底部各安装一个半球形 LED 阵列,实现三维空间的全覆盖。机间采用半球形 LED 阵列进行通信时,考虑一种小收发仰角的近似直视(ALOS)通信模型。ALOS 通信指当发射光束的发散角和接收视场角都较小时,传输的光信息可以绕开通信两端的障碍物,通信方式为窄发散角发送-窄视场角接收。图 3 为紫外光 ALOS 通信链路模型,其中  $\varphi$  是发散角,  $\psi$  是发射端与发射光轴之间的夹角。

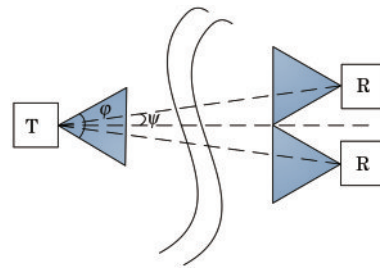


图 3 紫外光 ALOS 通信链路模型  
Fig. 3 UV ALOS communication link model

### 4 UVORF 算法

UVORF 算法可分为 4 个阶段:邻居发现阶段,编队中的每架无人机利用信息帧的通信方式寻找自身的邻居节点,并存储所有邻居节点的相关信息;权值计算阶段,根据紫外光通信的路径损耗公式确定链路权值函数,构建稳定可靠的编队网络;拓扑构建阶段,根据链路权值函数构建最优刚性拓扑,在降低网络能耗的同时提高编队的容错性能;功率调整阶段,所有无人机将发射功率调整为能与自身最远逻辑邻居节点进行通信的最小功率。算法的具体流程如图 4 所示。

#### 4.1 紫外光邻居发现方法

要使无人机能发现最大通信范围内的所有邻居节点,发信机发出的紫外光光束必须能覆盖节点周围的三维空间。考虑到球形结构的覆盖性能最好,为了简化设计,以半球形通信节点结构为基础,在无人机的顶部和底部各搭载一个半球形 LED 阵列。图 5 为半球形通信节点结构图,它的表面被经线和纬线包围,在经纬交接处安装紫外 LED。每个 LED 都有一个编码,由经线号和纬线号组成,反映 LED 发射光束相对于节点自身的方向。此结构的三维覆盖效果与 LED 的排列密度和光束发散角都有关,LED 排列越密集且发散角越大,覆盖效果越好<sup>[17]</sup>。但 LED 数量的增加会加大系统的控制复杂

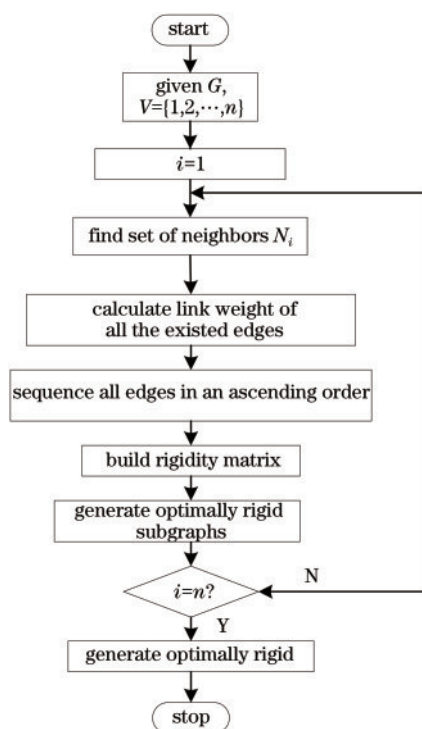


图 4 UVORF 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of UVORF algorithm

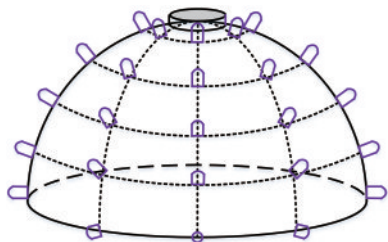


图 5 半球形通信节点结构

Fig. 5 Hemispherical communication node structure

度,发散角增大会使有效通信距离减小。因此在实际应用中,应合理布置 LED 阵列且选择合适的光束发散角。

链路未建立时,无人机以信息帧的方式来寻找自身的邻居节点。首先会发送一个发送信息帧,因为不知道邻居节点的具体方位,所以采用经纬向交替扫描的形式交互通信。发送信息帧的内容主要包括节点的识别号即 ID 号、当前的位置坐标  $P$  及 LED 的经纬向编码。当周围的邻居节点接收到来自同一节点发出的经纬向编码后,会通过同样的扫描方式发送一个应答信息帧。应答信息帧的内容不仅包括节点自身的 ID 号、位置坐标  $P$ 、方向编码  $L$ ,还包括发送节点的信息。无人机在接收到邻居节点的应答信息帧后,会建立一个自身的邻居信息列表  $I_{inlist,i}^1$ ,格式如表 1 所示,该列表用于后边链路权

值的计算。表 1 中,  $n_{nid}$  为邻居节点的 ID 号。

表 1 节点  $i$  的邻居信息

Table 1 Neighbor information of node  $i$

Neighbor information of node $i$	
$n_{nid}$	
$P$	
$L$	

### 4.2 链路权值计算

无人机编队中可靠的链路能有效改善通信传输质量,同时提高网络能量利用率。无人机间进行通信时,链路权值设为紫外光通信路径损耗。当通信距离增加时,路径损耗以指数的形式衰减,所以紫外光通信衰减比较严重。在实际应用中,对于较小的收发仰角,一般采用简化公式<sup>[18]</sup>,形式为

$$L = \xi d^\alpha, \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为路径损耗指数因子;  $\xi$  为路径损耗因子;  $d$  为通信距离。由(3)式可知,路径损耗与  $\alpha$ 、 $\xi$  的取值有关,不同收发仰角通信时,对应的  $\alpha$  和  $\xi$  值不同,部分取值可参考文献<sup>[19]</sup>。无人机基于半球形 LED 阵列通信时,机间采用一种小角度的 ALOS 通信链路模型,当给定收发端空间角度参数时,  $\alpha$  和  $\xi$  值也可以确定。本文 LED 收发仰角设为  $10^\circ$ ,即对应的  $\alpha$  为 2.049,  $\xi$  为  $6.54 \times 10^4$ 。列表中存储了节点  $i$  的所有邻居节点的位置坐标,可计算出节点  $i$  与其邻居节点构成的点集的所有链路长度,进而由(3)式计算链路的权值,并存入链路信息列表中,拓扑构建时优先选择路径损耗较小的可靠链路。

### 4.3 最优刚性拓扑构建

在引入紫外光通信链路权值的基础上,构建具有良好特性的编队通信拓扑,具体可分为以下 3 个步骤。

1) 根据链路权值,对节点的  $I_{inlist,i}^2$  进行升序排列;

2) 根据排序结果,构建每个节点的刚性矩阵,并根据最优刚性图生成原理计算每个节点的最优刚性矩阵,生成局部最优刚性子图,得到的链路存储于  $E_i$  中;

3) 节点  $i$  以最大通信半径发送以  $E_i$  为内容的信息包,并接受所有邻居节点的该信息包,最后通过删除不属于全局最优刚性图的链路得到最优刚性编队。

此阶段算法的具体执行过程如表 2 所示,其中  $N_i$  为无人机  $i$  的邻居个数。

表 2 拓扑构建伪代码

Table 2 Pseudo-code of topology construction

Topology construction procedure
1. sequence link weights in ascending order of $I_{inlist,i}^2$
2. build the rigidity matrix $M_i'$ of the subgraph, initialized $M_i$ as the first row of $M_i'$
3. for $j = 1: \text{size}(I_{inlist,i}^2)$
4. if $\text{rank}(M_i) \leq 3(N_i + 1) - 6$
5. $M_i = \begin{bmatrix} M_i \\ M_i'(j + 1, :) \end{bmatrix}$
6. if $M_i$ is full rank
7. record the edge corresponding to the row in $E_i$
8. end
9. end
10. end
11. end
12. for $i = 1: n$
13. for $l = \{i, N_i\}$
14. for $k = \{i, N_i, k \neq l\}$
15. if $(l, k) \notin E_i$
16. delete all $(l, k)$ in the records $E_q (q \in i \cup N_i)$
17. end
18. end
19. end
20. end

为了详细介绍 UVORF 算法,下面举例说明拓扑构建过程。图 6(a) 为节点 A 和它的邻居节点组成的子图,位置坐标在图中已经标出,为简便起见,链路权值设为节点间的欧氏距离。首先对节点间距离值进行升序排列,排序后的结果如表 3 所示。

表 3 升序后的链路权值

Table 3 Weights of links after ascending sequence

Link	Weight value
$l_{BC}$	1
$l_{AB}$	2
$l_{AD}$	2
$l_{AC}$	$\sqrt{5}$
$l_{CD}$	$\sqrt{7}$
$l_{BD}$	$\sqrt{8}$
$l_{AE}$	3
$l_{BE}$	$\sqrt{13}$
$l_{DE}$	$\sqrt{13}$
$l_{CE}$	$\sqrt{14}$

根据表 3 中的排序结果,建立子图的刚性矩阵  $M_i'$ ,构造规则为

$$M_i' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -3 & -2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & -3 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$M_i'$  的行与列分别对应拓扑图中边和顶点的坐标。由最优刚性图原理可知,最终生成的拓扑图有  $3n - 6 = 3 \times 5 - 6 = 9$  条边,且对应刚性矩阵的秩也为 9。首先初始化矩阵,  $M_i$  为  $M_i'$  的第一行,然后按照排序结果依次添加一行,形成新的矩阵,并计算新矩阵的秩。如果为满秩,保留此行,否则删除此行添加下一行,直到获得秩为 9 的满秩矩阵,即最优刚性矩阵中有 9 个线性无关的向量。按照此规则生成的最优刚性拓扑如图 6(b) 所示,由链路  $(A, B)$ 、 $(A, C)$ 、 $(A, D)$ 、 $(A, E)$ 、 $(B, C)$ 、 $(B, E)$ 、 $(C, D)$ 、

$(C, E)$ 、 $(D, E)$  组成的图即为节点 A 和它的邻居节点构成的局部最优刚性图。

所有节点根据上述方法构建自身的局部最优刚性拓扑,最后通过删除不属于全局最优刚性图的链路得到最优刚性编队。无人机从所提算法的所有物理邻居节点中选择了合适的逻辑邻居节点进行通信,降低了通信传输时的能量消耗且保证了链路的可靠性。在算法的最后执行阶段,每架无人机将发射功率调整为能够覆盖自身所有逻辑邻居节点的最小功率。

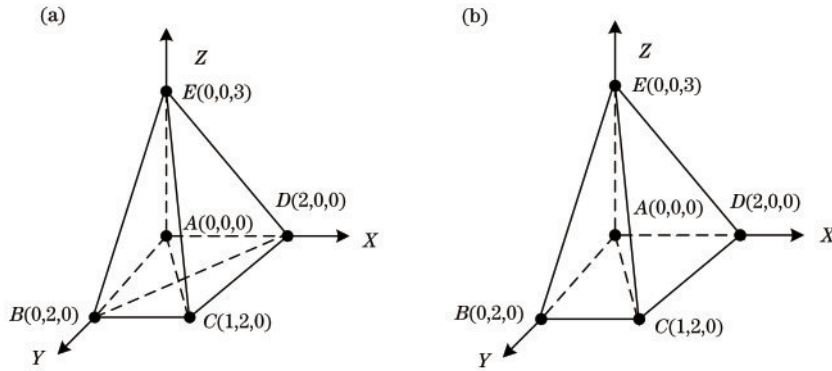


图 6 节点 A 与其邻居节点组成的局部拓扑。(a) 初始拓扑; (b) 最优刚性拓扑

Fig. 6 Local topology composed of node A and its neighbors. (a) Initial topology; (b) optimal rigid topology

## 5 仿真分析

### 5.1 邻居发现方法性能仿真

无人机要发现通信范围内的所有邻居节点, 必须选取合适的半球形 LED 阵列参数。对邻居发现方法性能进行了仿真, 通过多次求取平均值的方法来获得邻居发现成功概率。仿真开始时, 随机分布的无人机依次寻找自身的邻居节点。图 7 为邻居发现成功概率与 LED 光束发散半角的关系曲线。由图 7 可以看出, 发现成功概率随光束发散半角的增

大显著增加, 且当经纬向个数越多时, 发现成功概率也是逐渐增大的, 选取合适的参数时可接近于 1。这是因为随着光束发散半角的增大和 LED 排列的密集, 光束的覆盖盲区变小, 所以邻居发现成功概率也逐渐增加。但 LED 个数的增加会使系统的控制复杂度上升, 且光束发散半角越大, 有效通信距离会下降, 所以并不是越大越好, 需要根据实际情况选取合适的参数。从图 7 可看出, 当经向个数  $M=5$ , 纬向个数  $N=16$ , LED 光束发散半角为  $15^\circ$  时, 邻居发现成功概率非常接近于 1。

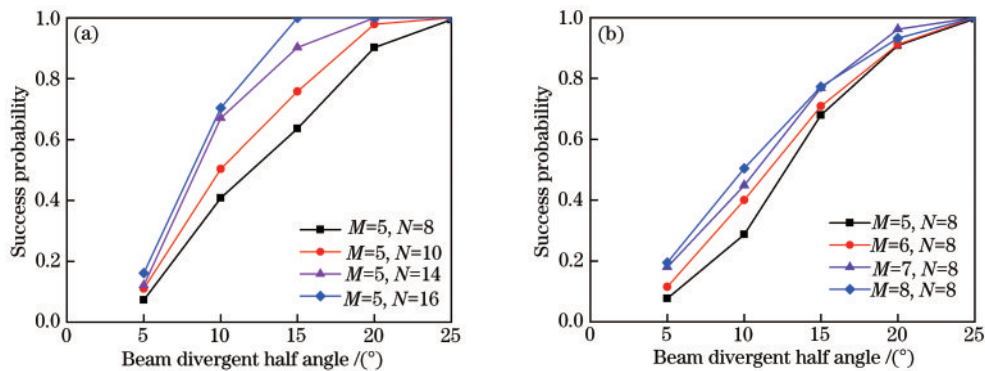


图 7 邻居发现成功概率曲线。(a) 经向个数不同; (b) 纬向个数不同

Fig. 7 Curves of neighbor discovery success probability.

(a) Different number of longitude; (b) different number of latitude

### 5.2 UVORF 算法仿真

为了验证所提 UVORF 算法的性能, 对其与基于图论的分布式拓扑控制算法  $GG^{3D}$  和  $RNG^{3D}$  进行比较。在相同的仿真环境下构建编队通信拓扑, 部分仿真参数如表 4 所示。

#### 5.2.1 不同编队拓扑结构的对比

在仿真区域内随机部署 12 个无人机节点, 不同算法构建的编队拓扑结构如图 8 所示。图 8(a) 为所有无人机使用最大功率工作时生成的编队拓扑, 可

以看出, 此时链路数量很大, 但编队通信复杂度极高, 会加快网络的能量消耗。图 8(b) 为 UVORF 算法生成的编队拓扑, 每个无人机都至少和 3 个邻居节点进行通信, 当编队中某个节点或某条链路出现故障时, 网络仍能保持连通, 增强了网络的容错性; 同时, 无人机的邻居节点分布均匀, 有利于提高网络寿命。图 8(c)、(d) 分别为使用  $GG^{3D}$  和  $RNG^{3D}$  算法构建的拓扑,  $GG^{3D}$  和 UVORF 算法的链路数相差不多, 但  $GG^{3D}$  算法构建的拓扑结构中长链路数较

表 4 部分仿真参数

Table 4 Part simulation parameters

Parameter	Value
Area/(m × m × m)	100 × 100 × 100
Number of nodes	12
Maximum communication radius/m	70
Wavelength λ/nm	250
Number of longitude M	5
Number of latitude N	16
Sending and receiving elevation/(°)	10
$\xi$	$6.54 \times 10^4$
$\alpha$	2.049

多,可能会消耗更多的能量;RNG<sup>3D</sup>算法构建的编队拓扑中某些节点只有一个邻居节点,如果出现干扰或故障,通信链路将会被中断,影响无人机间的通信。因此,UVORF算法在节约编队网络能耗的同时增强了网络的容错性。

### 5.2.2 算法性能分析

节点度为网络中能与该节点直接通信的邻居个数,可通过所有节点的节点度之和与节点数目的比值计算得到平均节点度。节点度过高会导致通

信干扰增强,无人机间进行数据传输时可能需要多次重发,这会造成能量消耗增加;而低的节点度会使通信链路过长,造成紫外光通信路径损耗增加,进而影响链路可靠性。图 9 为无人机节点数目为 20~60 时,不同算法的多次平均节点度。可以看出:随着节点数目的增加,无拓扑控制算法的平均节点度线性增长,可能会消耗更多的能量;UVORF 算法构建的编队拓扑平均节点度趋于稳定值 6,即节点数目的增加不会影响与无人机能直接通信的邻居节点数,表明 UVORF 算法保留了较为合理的链路数,减小了编队网络中节点间通信时的干扰;RNG<sup>3D</sup>算法构建的编队拓扑平均节点度随节点数目的增加变化趋势虽然比较平稳,但当节点数目很大时,仍在 3 左右,构建的编队网络链路过于稀疏;GG<sup>3D</sup>算法的平均节点度也在 6 左右,但变化较大,表明该算法稳定性较差。

图 10(a)和(b)分别为不同算法的最大节点度和最小节点度,最大节点度定义为网络中拥有逻辑链路数最多的节点的度数,最小节点度与之相反。由图 10(a)可知,RNG<sup>3D</sup>算法的最大节点度随着节

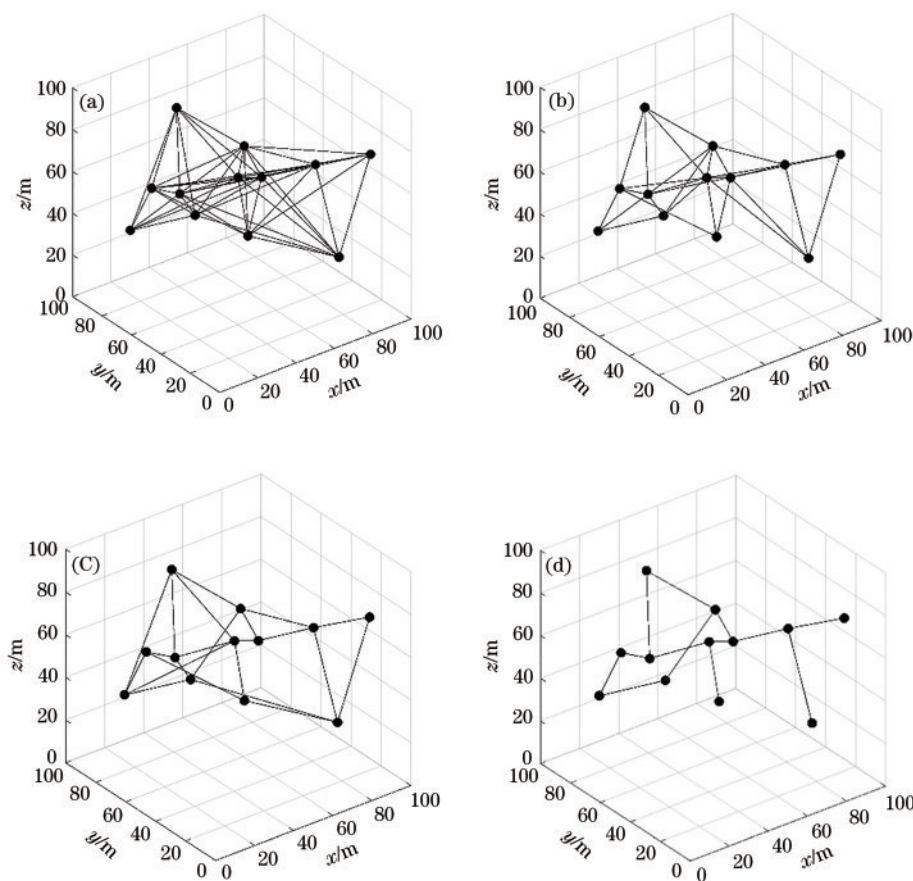


图 8 不同算法生成的编队拓扑结构。(a)最大功率拓扑;(b)UVORF;(c)GG<sup>3D</sup>;(d)RNG<sup>3D</sup>

Fig. 8 Formation topologies derived by different algorithms. (a) Maximum power topology; (b) UVORF; (c) GG<sup>3D</sup>; (d) RNG<sup>3D</sup>

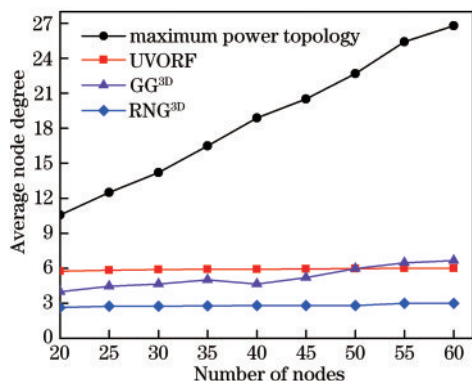


图 9 平均节点度的对比

Fig. 9 Comparison of average node degree

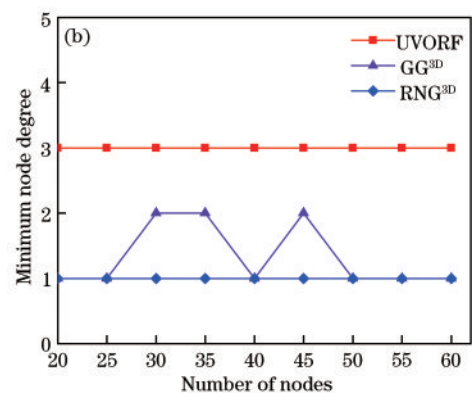
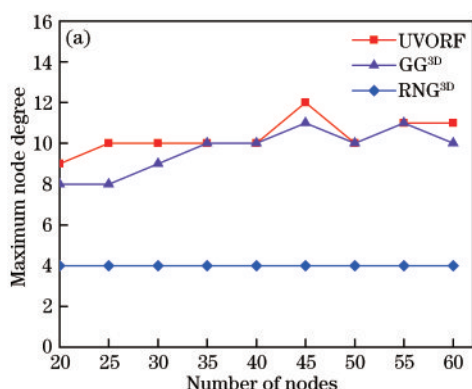


图 10 节点度对比。(a)最大节点度;(b)最小节点度

Fig. 10 Comparison of node degree. (a) Maximum node degree; (b) minimum node degree

点数目的增加一直保持在 4 左右,进一步表明该算法的节点度过低。从图 10(b)可看出:UVORF 算法的最小节点度一直保持在 3 左右,即由它生成的编队拓扑结构是 3-容错的,网络鲁棒性较强;GG<sup>3D</sup> 算法和 RNG<sup>3D</sup> 算法的最小节点度均可取值为 1,说明这两种算法是 1-容错的,当编队中某条链路断开时,其他节点不能继续维持网络的连通性,造成编队网络的容错性较差。

图 11 为节点数目变化时不同算法节点通信半

径的比较。网络中节点的通信半径为节点与其最远逻辑邻居节点间的欧氏距离,平均通信半径为网络中各个节点的通信半径之和与节点数目的比值。网络中节点的平均通信半径越大,紫外光通信的路径损耗越大,进而网络的通信能耗也越大。由图 11 可看出:当节点数目相同时,GG<sup>3D</sup> 算法的平均通信半径最大,表明由它生成的编队拓扑结构耗能最多;RNG<sup>3D</sup> 算法和 UVORF 算法的平均通信半径相差不多,但 RNG<sup>3D</sup> 的链路数远远小于 UVORF 算法,表明 RNG<sup>3D</sup> 算法构建的编队拓扑结构中不全为最小能耗链路。

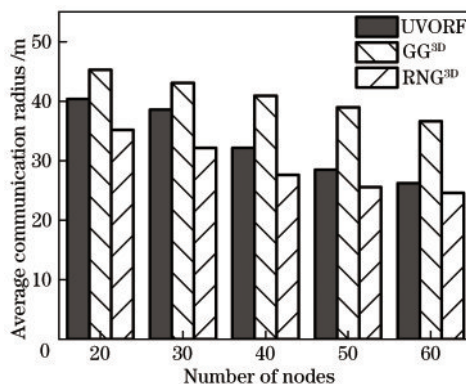


图 11 平均通信半径的对比

Fig. 11 Comparison of average communication radius

## 6 结 论

将紫外光通信应用于无人机编队网络中,提高了机间通信的可靠性。设计半球形通信节点结构来协助无人机发现自身的邻居节点,并采用一种基于信息帧的邻居发现方法。对该方法进行仿真分析,可得出:在一定的通信范围内,选取合适的经纬向个数和光束发散半角能取得良好的邻居发现效果。在此基础上,提出一种最优刚性编队分布式生成算法。该算法利用紫外光通信路径损耗作为链路选择标准,优先选择路径损耗较小的可靠链路构建最优刚性拓扑。仿真结果表明,对于网络通信而言,所提算法降低了编队通信复杂度,减小了网络能量消耗,同时具有良好的容错性和合适的平均节点度,实现了网络拓扑结构的优化。

## 参 考 文 献

[1] 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.



- [2] Li H T, Li X Y, Ye Y Z, et al. Ultraviolet communication and its military application prospect [J]. *Information & Communications*, 2016, 29(12): 60-62, 66.  
李海涛, 李晓毅, 叶永楨, 等. 紫外光通信及其军事应用前景[J]. *信息通信*, 2016, 29(12): 60-62, 66.
- [3] 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.  
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.
- [4] 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.
- [5] Zhao T F, Liu Y J, Wang X F. Analysis of wireless ultraviolet communication performance in application of helicopter landing assistance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 060602.  
赵太飞, 刘一杰, 王秀峰. 直升机降落引导中无线紫外光通信性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 060602.
- [6] Toussaint G T. The relative neighbourhood graph of a finite planar set [J]. *Pattern Recognition*, 1980, 12(4): 261-268.
- [7] Gabriel K R, Sokal R R. A new statistical approach to geographic variation analysis [J]. *Systematic Zoology*, 1969, 18(3): 259-278.
- [8] Li N, Hou J C, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 1195-1206.
- [9] Kang S M, Park M C, Ahn H S. Distance-based cycle-free persistent formation: global convergence and experimental test with a group of quadcopters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(1): 380-389.
- [10] 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.  
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.
- [11] Sun M T, Chu C H, Wu E H K, et al. Distributed topology control for energy-efficient and reliable wireless communications [J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(3): 2152-2161.
- [12] Zhang X W, Zhao S H, Li Y J, et al. Multi-channel directional media access control protocol for airborne ultraviolet communication based on space division multiplexing [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 451-455.  
张曦文, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向 MAC 协议 [J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 451-455.
- [13] Bae Y B, Lim Y H, Ahn H S. Edge deletion algorithm for minimally rigid graph using consensus protocols [C] // 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology, March 22-25, 2017, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2017: 30-36.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.  
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.
- [17] Zhao T F, Wang J, Zhang J, et al. Neighbor discovery method for frogmen cooperation in underwater wireless optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206002.  
赵太飞, 王晶, 张杰, 等. 蛙人协作中的水下无线光通信邻居发现方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206002.
- [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] He Q, Sadler B M, Xu Z. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7464: 74640H.