

面向无人机自组网编队控制的通信组网技术

程 潇<sup>1</sup> 董 超<sup>2</sup> 陈贵海<sup>1</sup> 王蔚峻<sup>1</sup> 戴海鹏<sup>1</sup>

(南京大学计算机科学与技术系 南京 210023)<sup>1</sup> (南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)<sup>2</sup>

**摘 要** 随着技术的发展,多无人机系统协同作业的研究得到越来越多的关注。编队控制是无人机协同作业的关键技术,对具有动态信道与拓扑特征的无人机自组网的通信组网技术提出了极高的要求。首先介绍了无人机自组网编队控制的相关模型;基于此,从编队保持和重组、任务更新、编队可靠性等方面综述并分析了 5 种编队控制策略以及它们对无人机自组网通信组网技术的不同需求;最后展望了面向无人机自组网编队控制的通信组网技术的发展前景和方向。

**关键词** 无人机,自组网,编队控制,通信组网

**中图法分类号** V279,TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.001

Communication and Networking Techniques for Formation Control in UAV Ad Hoc Networks

CHENG Xiao<sup>1</sup> DONG Chao<sup>2</sup> CHEN Gui-hai<sup>1</sup> WANG Wei-jun<sup>1</sup> DAI Hai-peng<sup>1</sup>

(Department of Computer Science and Technology,Nanjing University,Nanjing 210023,China)<sup>1</sup>

(College of Electronic and Information Engineering,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 211106,China)<sup>2</sup>

**Abstract** With the development of technology,the research on the collaboration of multi-UAV (Unmanned Aerial Vehicle) systems gains increasing attention. As a key technique for the collaboration of multiple UAVs,formation control brings huge challenges to the communication and networking techniques for UAV ad hoc networks featuring dynamic channel and topology. Firstly,the related models of the formation control in UAV ad hoc networks were introduced. Then,from the aspects of formation keeping and reconfiguration,mission update,reliability,etc. ,five formation control strategies and their requirements of the communication and networking techniques for UAV ad hoc networks were surveyed and analyzed. Finally,the research prospects and directions of the communication and networking technologies in UAV ad hoc networks were proposed.

**Keywords** Unmanned aerial vehicle,Ad hoc network,Formation control,Communication and networking

1 引言

随着无线通信与电子技术的发展,无人机组网的协同作业得到了越来越广泛的关注。无人机组网继承了自组织网络灵活性高、可动态重构、自主性强等优点<sup>[1-2]</sup>,将是未来无人机协同作业的一种重要形式,主要被应用于侦察巡逻<sup>[3]</sup>、灾难监控<sup>[4-5]</sup>、搜索救援<sup>[6]</sup>和应急通信保障<sup>[7]</sup>等领域。

编队控制是无人机协同作业的关键技术,通过某种策略,在避免碰撞的前提下使多个无人机按一定的编队结构移动来完成规定的协同作业任务<sup>[8]</sup>。一般来说,编队控制存在如下 3 个重要问题:编队保持与重组、任务更新及编队可靠性。其中,编队保持是要求无人机在移动的同时保持所期望的队形结构<sup>[8-10]</sup>,需要强调的是,队形结构的保持可能需要考虑通信拓扑的需求,以保证一定的网络连通性与业务的 QoS(服务质

量)。与此相关的编队重组则是根据任务要求优化编队结构和组网拓扑等<sup>[11-13]</sup>,以重新调整编队结构,这可能需要无人机之间大量和频繁地交互信息且计算量较大。此外,无人机自组网在执行任务时可能会收到新的命令从而执行新任务,这就需要考虑编队中的任务更新,其涉及到如何传输任务信息,并且可能需要考虑时延要求。最后,可靠编队是无人机网络编队控制的重要要求,涉及到通信容错性、节点容错性和节点扩展性等。总的来说,编队控制需要协同作业的无人机之间以低时延和高可靠性来交互大量的位置以及安全控制类消息。考虑到无人机自组网需要无人机之间在没有任何基础设施的情况下交互信息、拓扑动态变化以及无线信道衰落严重等因素,编队控制为无人机自组网的通信与组网技术带来了巨大的挑战。

文献[1]从移动性、拓扑和能耗等方面比较了移动自组

到稿日期:2018-01-07 返修日期:2018-04-09 本文受国家自然科学基金(61472445,61631020,61702525,61702545)资助。

程 潇(1993—),男,硕士生,主要研究方向为无人机组网,E-mail:ichxiao@qq.com;董 超(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信、计算机网络,E-mail:dch999@gmail.com(通信作者);陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感网络、并行计算、P2P 网络;王蔚峻(1992—),男,博士生,主要研究方向为无人机组网;戴海鹏(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线充电技术、无线传感网络。

网、车载自组网和无人机自组网,并比较分析了各种自组网的路由协议和节能策略。文献[14]综述了民用无人机应用领域中通信组网的特点和需求,包括搜索援救、覆盖、建造和运送物品等应用。然而,以上文献都没有讨论无人机自组网编队控制的通信组网的性能要求。文献[15]探讨了各种用于无人机组网的移动模型,并分析了在不同移动模型下的无人机组网的网络性能,然而这些移动模型都具有很大的随机性,并且无人机间的移动比较独立,协同性要求较低。文献[2]将无人机自组网归类为飞行自组网(FANET),并分析了各层网络协议的特点和设计要求,但其同样只考虑了无人机自组网移动模型较随机的情况,没有考虑编队的要求。文献[16]中考虑了交互信息较粗糙时的一致性编队策略,可以在交互信息不精确时获得一定的编队结构,即只需知道相对位置与预设值的相对大小关系,但没有考虑通信性能对编队的影响。文献[17-18]研究了领导跟随者编队策略中的通信拓扑控制问题,所提算法能使无人机组成较优的通信拓扑并容忍一些故障,但该研究只考虑了编队拓扑总代价最小,没有考虑编队控制信息的传输要求。文献[19]综述了 multi-agent 系统的编队控制,主要关注于感知能力并讨论了如何达到编队的交互拓扑要求,但没有考虑时延等其他通信要求。文献[20-25]研究了 multi-agent 系统中的一致性问题,考虑了在不同拓扑和时延下的收敛性,这主要都是基于一致性的编队控制。国内近年来也有很多关于编队控制的研究<sup>[26-35]</sup>。文献[26]从一致性编队生成和编队跟随两个方面综述了一致性 multi-agent 编队控制的主要研究成果。文献[27]研究了存在时延的分布式无人机编队控制方法,考虑了有向通信拓扑以及时变时延的情况。文献[28]调查了无人机协同编队控制的相关技术研究,包括信息感知、数据融合、任务分配和航迹规划等技术,并从队形的设计、调整和重构等方面对无人机编队控制的相关研究进行了调查和总结。无人机成本低且灵活,而有人机能有效利用人类的决策智慧,将两者混合可以充分发挥作战效能,文献[29-30]综述了有人机/无人机混合编队协同作战的相关研究。然而,大部分无人机编队控制中的相关研究<sup>[8,16,36-38]</sup>也都假设通信拓扑图连通或存在生成树,很少会具体考虑时延和带宽等网络性能的要求。总之,在控制领域中,编队控制的研究主要关注控制且假设存在完美通信,也有一些关于一致性问题的研究考虑了动态拓扑及时延的问题。在通信领域中,网络协议的研究也都主要考虑随机性移动模型的无人机自组网,各种无人机的应用研究中很少有面向无人机编队控制的通信组网研究。由此来看,面向无人机自组网编队控制的通信组网技术还存在研究空白,对其研究现状进行综述有助于进一步开展该领域的研究工作。

总的来说,编队控制是无人机协同作业的关键技术,它对具有动态信道与拓扑特征的无人机自组网的通信组网技术提出了极高的要求。文中第2节介绍了无人机自组网编队控制的相关模型以及编队控制策略;第3—7节从编队保持与重组、任务更新和编队可靠性等方面综述并分析了5种编队控制策略以及无人机自组网通信组网技术的不同特点和需求;第8节对不同编队控制策略的特点和通信组网要求做了总结;第9节展望了面向无人机自组网编队控制的通信组网技

术的发展前景和方向;最后总结全文。

## 2 无人机自组网编队控制模型与策略

### 2.1 相关模型

无人机自组网的特点包括节点移动性强、网络拓扑变化频繁、链接易间断等,这些因素给无人机自组网的编队控制带来了很大的困难。同时,无人机自组网若保持一定的编队结构移动,则能减少拓扑变化和链接切换,从而提升网络性能。编队控制需要无人机的状态信息(如,位置、速度等),并根据无人机动力学模型计算相应的控制,使无人机产生期望的移动。无人机间通过自组网的形式交互状态等控制信息,因而自组网网络性能对编队控制会产生很大的影响。下面分别介绍与无人机自组网编队控制相关的模型:无人机状态模型、编队拓扑模型、无人机动力学模型和控制模型。

#### 2.1.1 无人机状态模型

假设无人机自组网中存在  $N$  架无人机,编队控制就是协调这  $N$  架无人机,使其保持特定的结构并按一定的规则移动。设  $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$  为无人机节点集合。每个节点通过信息交互获得对方状态等信息。无人机节点  $i \in \mathcal{N}$  在  $t$  时刻的状态表示为:

$$S_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t), v_i(t), \theta_i(t), \phi_i(t)]^T \quad (1)$$

其中,  $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$  表示无人机  $i$  的位置,  $v_i$  表示节点  $i$  的速度大小,  $\theta_i$  是无人机的航向角,  $\phi_i$  为俯仰角。若考虑二维情况,则节点  $i$  的状态为:

$$S_i(t) = [x_i(t), y_i(t), v_i(t), \theta_i(t)]^T \quad (2)$$

又可将节点  $i$  在时刻  $t$  的状态简单地统一表示为:

$$S_i(t) = [p_i(t), v_i(t)] \quad (3)$$

其中,  $p_i$  和  $v_i$  分别为无人机的当前位置和速度向量。

#### 2.1.2 编队拓扑模型

无人机节点间通过自组网交互信息,但无人机的移动速度较大,网络拓扑可能频繁发生变化。一般用图来表示网络拓扑结构。无人机节点  $i \in \mathcal{N}$  的邻节点集合的定义为:

$$\mathcal{N}_i = \{j | i \text{ 能收到 } j \text{ 的信息}\} \quad (4)$$

加权通信链路拓扑图可表示为:

$$G = (\mathcal{N}, E, W) \quad (5)$$

其中,边集合  $E = \{e_{ij} | j \in \mathcal{N}_i, i \in \mathcal{N}\}$ ,  $W(e_{ij})$  为边  $e_{ij}$  的权重(可表示相应链路的通信开销或通信距离等)。 $G$  可以有向或无向图,无向图可认为是特殊的有向图。

在编队控制中,控制信息传输可能只用到部分的通信链路,这些链路组成的通信图被称为编队信息交互拓扑图  $\mathcal{G}$  或者简称为通信拓扑图,并且  $\mathcal{G} \subseteq G$ <sup>[17]</sup>。由于各种因素的影响,无人机节点间的距离会动态变化,这会导致  $G$  频繁发生变化,且由于通信链路的选择不同,即使  $G$  不变,  $\mathcal{G}$  也可能变化。 $G$  与节点间的距离以及节点的通信能力有关,而  $\mathcal{G}$  与链路的选择策略有关。编队的重组可能会改变  $G$ ,同时也会导致  $\mathcal{G}$  的变化。因此,编队重组的拓扑优化可考虑链路拓扑  $G$  和通信拓扑  $\mathcal{G}$  的优化问题。

#### 2.1.3 动力学和控制模型

无人机自组网编队控制机制的设计即是在自组网的基础上根据应用要求设计相应的控制器  $H_i$ ,使得无人机动力学系

统  $F_i$  产生期望的移动,如形成某种编队结构和沿路线飞行等,如图 1 所示。

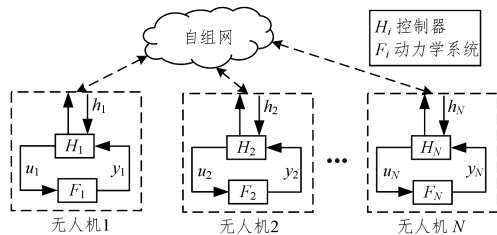


图 1 无人机自组网编队控制系统

Fig. 1 Formation control system of UAV ad hoc networks

无人机自组网编队的动力学系统编队控制模型可表示为<sup>[39]</sup>:

$$\begin{cases} F_i: \dot{S}_i = F_i(S_i, u_i, b_i) \\ H_i: u_i = H_i(S_i, h_i) \end{cases}, i \in \mathcal{N} \quad (6)$$

其中,  $S_i$  是节点  $i$  的状态,  $u_i$  是控制输入,  $b_i$  是干扰项或误差项,  $h_i$  是控制计算需要的外部信息如邻节点状态等, 记号  $\dot{x}$  表示  $x$  关于时间的导数。

对于无人机编队中的任意节点  $i \in \mathcal{N}$ , 本文考虑如下动力学模型  $F_i$ :

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i \end{cases} \quad (7)$$

或对于二维情况可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \end{cases} \quad (8)$$

控制模型  $H_i$  与具体的编队控制策略有关, 不同策略对应的控制模型有很大的差别。

如图 1 所示, 各无人机通过自组网交互编队控制所需的信息, 无人机节点  $i \in \mathcal{N}$  的控制器  $H_i$  利用收到的信息  $h_i$  计算出控制  $u_i$ , 然后  $F_i$  根据控制  $u_i$  产生相应的行为。其中  $y_i$  是对控制器的反馈, 对于模型(6), 有  $y_i = S_i$ 。

## 2.2 编队控制策略

编队控制对于多无人机系统而言至关重要, 多无人机间的协同工作需要相应的控制策略。目前有多种控制策略的分类方法, 比如依据控制形式可以将编队控制策略分为集中式控制策略<sup>[40-41]</sup>和分布式控制策略<sup>[8,12]</sup>。另外, 根据位置信息形式, 可将编队控制策略分为 3 类<sup>[19]</sup>: 1) 基于全局位置<sup>[42-44]</sup>; 2) 基于位移<sup>[45-47]</sup>; 3) 基于相对距离<sup>[48-50]</sup>。

本文综述了面向编队控制的通信组网技术, 它们用于保障编队控制所需要交互信息的性能。因此, 本文按照编队控制的思想, 将编队控制策略分为下列几类。

1) 基于势函数的策略: 通过定义无人机间的势函数或虚拟势场模仿电子间的电场或通过粒子引力场控制无人机的相对距离。

2) 领导跟随者策略: 编队中有一架无人机作为领导节点按应用要求移动, 其他无人机节点只需跟随领导无人机的移动。

3) 虚拟结构策略: 将整个编队视为单个整体, 设定虚拟编队结构的移动作为实际编队移动的参考, 各无人机追随虚拟结构中对对应节点的移动。

4) 基于一致性的策略: 无人机间不断交互协同信息, 并根据邻节点的协同信息调整自己的协同信息或协同变量, 当所有无人机的协同信息趋于一致时表示取得一致性。编队控制依据协同信息实现。

5) 基于行为的策略: 模拟鸟群、昆虫等生物群体的行为, 群体中各成员根据简单的行为规则移动。编队中无人机的行为包括避免碰撞和编队保持等, 各无人机根据行为要求产生相应的控制。

6) 混合及其他编队策略: 实际应用和研究中可能组合多种思想设计编队策略; 同时也有一些利用其他思想的编队策略, 如模糊逻辑控制等计算智能技术<sup>[31,51-52]</sup>和博弈论<sup>[53]</sup>等。

后文从 3 个角度来分析各种编队策略的通信和组网要求: 1) 编队保持和重组, 考虑保持编队和重组编队时的要求及特点; 2) 任务更新, 当基站下达新任务命令(目标位置或路线信息等)时命令的传输要求; 3) 编队可靠性, 包括编队可扩展性与对节点故障和通信故障的容错性、时延要求等。

## 3 基于势函数的策略

### 3.1 定义

基于势函数的控制策略中需要设计相应的势函数, 如碰撞避免和编队保持的势函数, 然后根据其负梯度得到相应控制。碰撞避免势函数用于保证当无人机间的距离过小时使其产生排斥的虚拟力, 而编队保持势函数要使得保持期望编队结构时的总势能最小。简而言之, 控制使得无人机向总势能减小的方向移动, 且总势能最小的状态为期望的最优状态。根据文献[8], 无人机  $i$  和  $j$  之间的碰撞避免势函数和编队保持势函数可分别定义为:

$$V_{ij}^a = \begin{cases} \eta_j e^{(\rho - d_{ij})/(\rho - R_a)}, & j \in \mathcal{D}_i \\ 0, & j \notin \mathcal{D}_i \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{ij}^f = \frac{1}{2} \| (p_i - p_j) - (p_i^f - p_j^f) \|^2 \quad (10)$$

其中,  $\eta_j > 0, 0 < \epsilon < 1, 0 < \rho < R_a$  为常数;  $d_{ij} = \| p_i - p_j \|$  是节点  $i$  和  $j$  之间的距离;  $p_i^f - p_j^f$  是期望编队结构中  $i$  和  $j$  的相对位置;  $\mathcal{D}_i = \{j | d_{ij} < R_a\}$  是碰撞检测节点集;  $R_a$  表示最大碰撞检测半径, 即当两架无人机间的距离小于  $R_a$  时, 它们之间就可能发生碰撞。对于需要移动到一个目标点  $p_g$  的应用情况, 可定义相应的势函数<sup>[54]</sup>:

$$V_i^g = \eta_g (1 - e^{-kd_{ig}^2}) \quad (11)$$

其中,  $d_{ig} = \| p_i - p_g \|$ ;  $k, \eta_g > 0$  为待定参数。

最后, 相对于无人机  $i \in \mathcal{N}$  的总势场为所有势函数的和:

$$V_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (V_{ij}^a + V_{ij}^f) + V_i^g \quad (12)$$

因此, 相应的控制  $H_i$  则为:

$$u_i = H_i(p_i, h_i) = -\frac{1}{m} \nabla_{p_i} V_i \quad (13)$$

其中, 无人机节点  $i$  的动力学模型  $F_i$  如式(7)所示;  $m$  是与无人机相关的常数, 若是异构情况则可表示为  $m_i$ 。



节点  $i$  的控制计算只需周围邻节点的位置信息即  $h_i = \{p_j | j \in \mathcal{N}_i\}$ 。各个节点可以独立地根据周围节点、障碍物和目标的相对位置信息得出各自的控制,即可以很容易地实现分布式控制。各节点周期地将其位置信息广播到周围节点,因此策略中编队的通信交互图  $\mathcal{G} = G$ 。如图 2 所示,节点 3 根据邻居节点的位置信息集  $h_3 = \{p_1, p_2, p_5\}$  计算相应的控制。

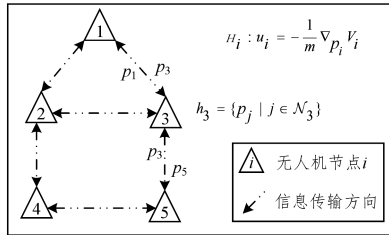


图 2 基于势函数策略的编队拓扑

Fig. 2 Formation topology of potential function based approach

### 3.2 相关研究

很多研究利用势函数策略实现无人机的碰撞避免<sup>[55-57]</sup>。文献[55]基于势函数的策略实现了利用多无人机系统探索变化复杂的 3D 环境应用,其能够探索建筑和隧道等复杂地形。文献[8]基于势函数方法提出了一种连续时间分布式控制策略,实现了无人机编队和重组,并考虑了动态无向连通通信网络拓扑。文献[54]研究了使用势函数的自治群系统的分布式控制策略,系统中的个体被看作是势场中的移动粒子,粒子总是向低势方向移动,但该研究没有考虑通信等时延对势函数计算误差的影响,个体若不能及时计算并做出反应则可能会产生碰撞。文献[32]提出了一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法,其通过设计相应的向心力、弹簧力和阻力得到期望转向速率,能够精确跟踪变曲率曲线路径,但没有考虑多无人机编队的情况。文献[33]中无人机编队的蜂拥(flocking)策略也使用了势函数的思想。

### 3.3 通信与组网需求

本节将从以下几个方面来分析基于势函数编队控制策略的特点和通信要求。

#### 1) 编队保持和重组

此编队控制策略中,每个无人机节点周期性地向相邻节点广播自己的状态信息以避免碰撞并保持编队结构,同时每个节点根据周围邻节点的位置(如 GPS 信息),由相应的势函数梯度计算出相应的控制  $u_i$  以控制无人机保持期望的编队和移动。势函数的计算只用到位置信息,无法充分利用速度等信息,比如当两架无人机的相对速度较大时,由于传输时延和计算时延的存在,若无法及时产生控制则可能无法保持编队稳定。同时,还需要考虑广播状态信息的时间间隔和频率,时间间隔越小传输控制信息所需带宽就越大,间隔增大则会降低编队的稳定性,这是研究中需要权衡的问题。另外,不同的势函数的组合可能产生一些平衡点,从而造成无法预料的编队<sup>[58]</sup>。基于势函数策略的编队重组中,在改变节点位置时,链路和通信拓扑会发生改变,节点间的通信可能会中断。如何进行优化和重组是一个挑战,比如优化重组时间和通信开销等。

#### 2) 任务更新

由于目标点信息或路径信息等任务信息需要通知到所有节点,若在任务中临时变更任务或发布命令,就需要广播到所有节点,如果整个编队组成的网络拓扑图不连通,那么可能无法将任务信息广播到所有节点,部分节点就可能脱离编队。任务更新的时差也会对编队产生影响,若节点收到任务的时间相差太大,先收到任务信息的节点将会提前根据新的任务移动,从而破坏编队。对此,可以加入同步机制,即当所有节点都收到任务后再同时更新控制或一定时差内更新控制。如何保证各节点收到新任务信息的时延差或者如何同步,是编队重组须研究的问题。

#### 3) 编队可靠性

节点间的移动比较独立,所以能容忍一些节点故障和通信故障,且只需单跳传输状态信息。编队控制对时延的要求不高,但节点故障可能使网络拓扑图的连通性降低,从而影响任务信息的发布。此编队方法的可扩展性强,扩展节点的方式简单;计算量只与邻节点数有关,不会随节点总数的增加而显著增加;编队灵活,能适用于复杂的环境,但其网络拓扑也会变化频繁。因为是基于势函数的方式,所以编队结构可能相对比较松弛,特别是在编队变化较大的情况下可能无法很好地保持编队的稳定。

### 3.4 小结

对于基于势函数的控制策略,组网中各个节点只需知道邻节点的存在以避免碰撞,每个节点周期性地广播其状态信息到邻节点,因此只需要单跳通信。时延的要求与具体环境应用有关,比如当两架无人机以高速度相对飞行时,就要求较短的时延,以尽快做出反应,避免碰撞;而当两架无人机的相对速度为零或负时,即使无通信也不会有碰撞。在更新任务时需要保证所有节点都收到任务信息,并且要考虑时延和时差等问题。

## 4 领导跟随者策略

### 4.1 定义

领导跟随者编队控制策略需要设定一个领导者节点,假定节点 1 是领导节点,其他节点都是跟随节点,如图 3 所示。领导节点根据任务要求独立移动,跟随节点跟随领导节点移动,即根据接收到的领导节点的状态信息进行计算控制。如图 4 所示,根据文献[17],无人机节点  $i$  的动力学模型  $F_i$  如式(8)所示,领导节点  $L$  只需按期期望路线移动,其他跟随节点  $i > 1$  的编队控制  $H_i$  为:

$$u_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = \frac{-1}{d} \begin{bmatrix} \cos \theta_{il} & -\sin \theta_{il} \\ \sin \theta_{il} & \cos \theta_{il} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -k_1 f'_{il} + v_L + l_{il} \omega_L \\ -k_2 l'_{il} - f_{il} \omega_L \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,  $\theta_{il} = \theta_i - \theta_L$ ;  $d, k_1, k_2 > 0$  是常数;  $f_{il}, l_{il}$  分别是领导节点和跟随节点之间的前向距离和侧向距离,并且有:

$$f'_{il} = f_{il} - f_{il}^d, l'_{il} = l_{il} - l_{il}^d \quad (15)$$

其中,  $f_{il}^d$  和  $l_{il}^d$  是期望的相对距离。

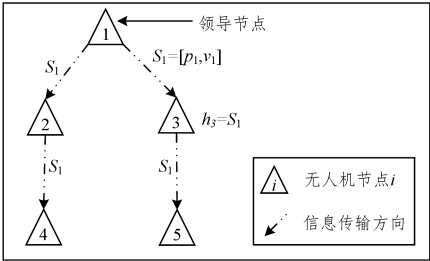


图 3 领导跟随者策略的编队拓扑

Fig. 3 Formation topology of leader-follower based approach

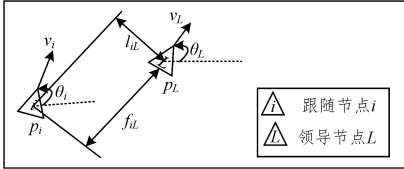


图 4 跟随节点与领导节点的相对位置

Fig. 4 Relative positions of follower and leader

此策略中所有跟随节点需要跟随领导节点的移动,即领导节点周期性地将其状态信息广播到各个跟随节点。领导节点按任务要求移向目标点或按特定路线飞行,其他节点只需要跟随领导节点,根据领导节点的状态信息计算出各自的控制,即有  $h_i = S_1$ , 其中  $S_1$  是领导节点的状态信息。跟随节点与领导节点的控制信息传输链路组成一个以领导节点为根节点的树型拓扑  $\mathcal{G} \subseteq G$ 。根节点周期性地广播其状态信息到其他节点,跟随节点根据领导节点信息和设定的编队结构信息调整各自的状态。整个编队的移动路线只需由领导节点决定,但如果没有反馈,领导节点移动太快可能导致跟随节点跟不上<sup>[10]</sup>,因此可增加反馈机制。

4.2 相关研究

文献[17-18]研究了领导跟随者编队策略下的无人机编队通信拓扑控制,其目标是通过建立特定的通信拓扑(用于传输编队控制所需的状态信息)来减少编队所需的通信开销,并能容忍一些通信故障,同时保持编队结构。文献[59]研究了动态交互拓扑下的领导跟随者编队策略,时变的通信拓扑要求任意时刻都存在生成树,即保证连通性。文献[60]中通过加权邻居的相对位置和速度实现跟随领导节点的共识。文献[61]研究了无需通信的领导跟随编队策略,利用传感器测量实现对领导节点的跟随。文献[62]提出了三节点组成三角形结构的领导跟随者控制策略,其中两个跟随节点的控制行为不同,编队可根据三角形结构组合扩展以实现更大的编队。文献[63]研究了领导跟随者控制策略中最优时间的编队重组问题。文献[64]中将领导跟随者编队问题转换成了共识问题,使用相对位置的测量而不需要全局坐标,且能容忍一定的位置测量误差。文献[34]中使用了反馈机制,领导节点能定时检查各跟随节点的位置,并且能随时更换领导节点以避免单点故障问题。文献[35]中也使用了输入/输出反馈方法,以提高编队的稳定性。

4.3 通信与组网需求

1) 编队保持和重组

领导跟随者编队控制策略中各跟随节点根据领导节点的

状态保持与领导节点之间的相对位置。编队需保证存在以领导节点为根节点的通信图生成树<sup>[18]</sup>,如何根据通信的最小生成树或最短路径技术优化编队通信拓扑是一大挑战。在转弯或变速的情况下,时延过大可能导致碰撞,即两架无人机产生相应控制的时间不一致,从而可能导致碰撞。编队重组时通信拓扑可能变化得很频繁,重组需要无人机节点间进行协调或由领导节点集中决策。领导节点到跟随节点的控制信息可能需要多跳传输,不同跳数节点的时延不同,编队控制的设计中需要考虑时延差的影响。

2) 任务更新

此策略的任务更新很简单,只需要将任务信息发送给领导节点,甚至跟随节点不需要知道任务信息,如目标点信息。领导节点直接与基站通信,或者通过其他节点多跳传输接收任务信息。

3) 编队可靠性

编队存在单点故障问题,因为所有跟随节点跟随领导节点,领导节点发生故障后会导致整个编队遭到破坏。在保证通信拓扑连通的情况下,可以容忍部分跟随节点故障和通信故障。信息传输跳数越多的跟随节点收到领导节点状态信息的时延就越长,即相应控制计算越滞后,时延长可能导致节点偏离期望编队较大。同样,因为时延的问题,编队扩展太大会影响编队的稳定性。节点间可增加反馈机制以提高编队系统的稳定性,但同时也会增加通信开销。

4.4 小结

在领导跟随者策略中,需要将领导节点的状态信息广播到所有其他节点,因而需要有以领导节点为根节点的通信拓扑生成树,且可能需要多跳传输。广播的通信路径优化是一个研究问题。不同节点收到信息的时延不同,因而其反应时间也不同,距领导节点远的节点如果时延过大则可能偏离编队,因此某些情况下需要考虑多跳时延问题。为避免单点故障,可增加领导节点的容错性以提高编队的可靠性。

5 虚拟结构策略

5.1 定义

虚拟结构策略的基本思想是将整个无人机自组网编队视为单个整体,通常是集中控制器控制所有节点<sup>[8,65-66]</sup>。首先需要设定一个虚拟的编队结构,控制器计算各个虚拟节点的位置或角度等状态信息,然后将这些信息周期地单播或广播到各个相应节点或直接将计算的控制信息传输到各个节点,各个节点  $i \in \mathcal{N}$  追随这些相应虚拟节点(期望位置)  $S_i^d$  的移动。虚拟结构控制策略可分为 3 个步骤<sup>[8,10]</sup>: 1) 给定虚拟结构的运动; 2) 将虚拟结构的移动转换为每架无人机的移动; 3) 设计各无人机的控制规则用于追随其期望的移动。虚拟结构策略很容易描述群体编队行为,同时能保持较紧密的编队;但如果是集中式控制,则可能出现单点故障问题。也有研究使用双向环通信拓扑实现分布式的虚拟结构策略,但同步是一个很重要的问题<sup>[67]</sup>。

对于文献[65]中虚拟结构策略的控制模型,节点  $i \in \mathcal{N}$  的动力学模型  $F_i$  如式(8)所示,则控制  $H_i$  为:

$$u_i = \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (16)$$

其中

$$v_i = v_i^d + c_i^x x_i^e - c_i^y \omega_i^d y_i^e + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \tilde{c}_{ij}^x (x_i^e - x_j^e) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \tilde{c}_{ij}^y \omega_i^d (y_i^e - y_j^e) \quad (17)$$

$$\omega_i = \omega_i^d + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \tilde{c}_{ij}^\theta (\theta_i^e - \theta_j^e) \quad (18)$$

其中,  $c_i^x, c_i^y, c_i^\theta$  为控制增益,  $\tilde{c}_i^x, \tilde{c}_i^y, \tilde{c}_i^\theta$  是互耦合增益, 并且

$$S_i^e = (x_i^e, y_i^e, \theta_i^e)^T \quad (19)$$

是相应的误差项,  $\square_i^d$  为虚拟结构中相应变量的期望值。

## 5.2 相关研究

文献[40]提出了一种基于虚拟结构的多层控制策略并将其应用于3架无人机编队的路线跟随问题中。文献[68]在无人机虚拟结构控制策略中加入了信息同步以减小邻居节点的相对距离误差, 并利用耦合和同步提高了无人机虚拟结构编队控制的鲁棒性。文献[67]提出了一种分布式的虚拟结构编队控制策略。文献[69]提出的虚拟结构编队策略即使在有风影响的情况下也能保持较高精度的位置控制。文献[70]采用了非线性模型预测控制方法并提出了一种基于虚拟结构的编队策略, 其利用基于不同优先级的改进避碰惩罚策略实现了能容忍通信延迟的碰撞避免。文献[71]针对在不一致参考信息情形下水下航行器间的通信时延和数据掉包问题, 研究了基于一致性算法和虚拟结构的编队控制问题。

## 5.3 通信与组网需求

如图5所示, 假设无人机节点1为中心控制节点, 若各节点与其他节点没有反馈, 则控制所需信息为  $h_i = S_i^d$ , 其通信拓扑为单向生成树  $\mathcal{G} \subseteq G$ 。因无反馈, 编队的可靠性较低, 使得各节点与其期望位置的偏差较大, 从而影响编队。图6中增加了反馈, 由于各节点编队控制需要邻节点的信息, 因此有  $h_i = (S_i^d, \{S_j^e | j \in \mathcal{N}_i\})$ , 则其通信拓扑为网状的, 且  $\mathcal{G} = G$ 。

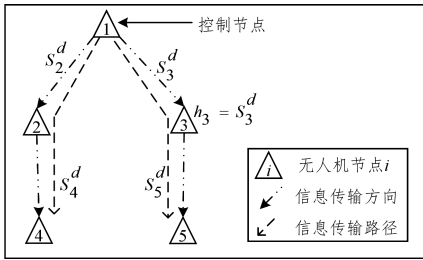


图5 虚拟结构策略的编队拓扑

Fig. 5 Formation topology of virtual structure based approach

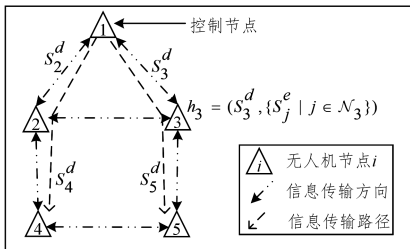


图6 考虑反馈信息和邻节点信息交互的虚拟结构策略的编队拓扑

Fig. 6 Formation topology of virtual structure based approach considering feedback and information exchange between adjacent nodes

## 1) 编队保持和重组

控制器计算各个节点的参考位置, 然后分别经过单跳或多跳传输到各个相应节点。各个节点根据得到的信息追踪对应虚拟结构中的参考点。不同节点收到相应信息的时间差与时延有关, 如果两节点收到相应控制信息的时延差较大, 则做出反应的时间差也大, 这可能会影响编队的稳定性。对于基于虚拟结构的编队重组, 需要实时计算重组时各时刻的虚拟结构, 结构变化的设计可能比较复杂并且不够灵活, 计算量也较大。

## 2) 任务更新

只需将任务更新到控制器节点, 其根据任务信息产生相应的控制, 控制节点直接与基站通信或经过其他无人机节点进行多跳传输。

## 3) 编队可靠性

一般情况下, 无人机组网能保持稳定且较紧(节点相对位置的波动较小)的编队结构。编队需要集中式控制, 可能存在控制器的单点故障。在通信状态不好或时延变化较大时, 可能发生碰撞且不能保持稳定的编队。增加节点数会增加控制器的计算量, 所以此策略不适合较大数量的编队。若编队受到干扰或虚拟结构速度太快而节点跟不上, 则可能导致维持不了编队<sup>[8]</sup>。因为各个节点在虚拟节点上的位置是固定的, 所以很难避免与障碍物的碰撞<sup>[72]</sup>。

## 5.4 小结

虚拟结构编队策略能使无人机形成相对稳定的结构, 但需要计算各个节点的位置, 因此需要很大的计算量并要求较高的通信质量<sup>[72]</sup>; 对时延要求较高, 同时时延抖动过大也可能破坏编队; 各节点位置信息计算结果需要分别单播到各个相应节点, 所以通信量较大。对此, 可根据最短路径等思想优化编队通信拓扑, 并使用多控制器分工或加入分布式编队策略来减轻计算量; 增加与邻节点和控制节点的反馈信息, 以提高编队的可靠性和稳定性。

## 6 基于一致性的策略

### 6.1 定义

一致性问题就是各个节点通过通信网络交互协同信息来达到某种状态, 当所有节点达到一致的状态时则称为取得了共识或一致性<sup>[37]</sup>。基于一致性的编队控制策略中协同信息可能是相对位置、速度、编队图心<sup>[12]</sup>和目标<sup>[37]</sup>等。设节点  $i \in \mathcal{N}$  的信息状态或协同信息为  $\xi_i$ , 则对于节点  $i$  一阶连续时间下的一致性协议可表示为<sup>[73-75]</sup>:

$$\dot{\xi}_i(t) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)) \quad (20)$$

其中,  $\alpha_{ij}(t) \geq 0$  是系数,  $\xi_j(t)$  是节点  $i$  收到的来自节点  $j$  的协同信息。若随  $t \rightarrow \infty$ , 有

$$\| \xi_i - \xi_j \| \rightarrow 0 \quad (21)$$

则表示编队能渐近取得一致性<sup>[73]</sup>。

考虑二阶一致性策略, 若要满足随  $t \rightarrow \infty$ , 有  $\xi_i \rightarrow \xi_j$  且  $\zeta_i \rightarrow \zeta_j \rightarrow \zeta^*$ , 则一致性算法如下<sup>[75]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \zeta_i \\ \dot{\zeta}_i &= \zeta_i - \alpha(\zeta_i - \zeta^*) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} [(\xi_i - \xi_j) + \beta(\zeta_i - \zeta_j)] \end{aligned} \quad (22)$$



其中,  $\alpha>0, \beta>0$ 。考虑式(7)所示的模型  $F_i$ , 则一个基于二阶一致性策略的控制  $H_i$  为<sup>[75]</sup>:

$$u_i = v^d - \alpha(v_i - v^d) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{ij} [(p_i - p_j - \delta_{ij}) + \beta(v_i - v_j)]$$

(23)

其中,  $\delta_{ij}$  是节点  $i, j$  间期望的相对位置,  $v^d$  是期望速度, 若随  $t \rightarrow \infty$  有  $p_i - p_j \rightarrow \delta_{ij}$  且  $v_i \rightarrow v_j \rightarrow v^d$ , 则表示渐近取得一致性。

6.2 相关研究

文献[73]研究了多节点协调的一致性问题。文献[36]基于一致性的方法提出了一种时变的编队控制策略。文献[37]分别研究了虚构网络下无邻节点相对速度信息和只有邻节点位置信息情况下的基于一致性的编队控制策略。文献[76]提出了一种基于事件的一致性控制策略。对于 multi-agent 系统中的编队控制问题, 有很多关于一致性的研究。文献[23]研究了异构通信时延的编队一致性问题。文献[24]研究了不同动态拓扑和时延的一致性问题。文献[25]提出了一种不均匀通信时延的时滞依赖编队控制算法, 并给出了渐近收敛的充分条件。文献[20-22]分析了 multi-agent 编队控制中一致性的收敛性或收敛速度。国内也有很多基于一致性编队控制的相关研究, 文献[26]从一致性编队生成和编队跟随两方面综述了一致性 multi-agent 编队控制的主要研究成果。文献[77]中研究了编队控制中考虑时延的一致性算法。文献[78]考虑了通信信息的不充分利用和传感器测量误差等问题, 通过一致性理论充分利用通信信息来修正测量和协同误差, 从而提高队形保持的精度。文献[79]利用双曲正切函数的有界性研究了基于输入约束下的一致性无人机编队控制问题。

6.3 通信与组网需求

此策略中各节点需要借助邻节点的信息来计算和更新相应的协同变量, 但信息可能不只是状态信息  $S_i$ 。如图 7 所示, 节点 3 需要与周围所有邻节点交互信息, 所以有  $h_3 = \{\xi_j \mid j \in \mathcal{N}_3\}$ , 整个通信拓扑是网状的并且有  $\mathcal{G} = G$ 。

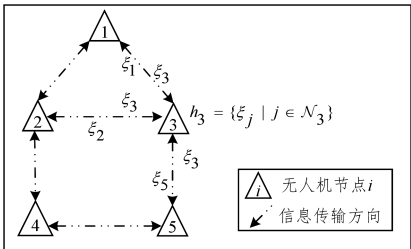


图 7 基于一致性策略的编队拓扑

Fig. 7 Formation topology of consensus based approach

2)任务更新

需要将任务信息广播到所有节点, 或者只需传输到部分节点然后通过一致性策略间接达到任务的一致性。文献[37]提出的策略考虑了只要求一个或部分节点有目标信息(位置、速度和加速度)的情况。为了便于对整个编队进行控制, 可使用领导跟随的一致性策略<sup>[22]</sup>, 其中的领导节点始终自主移动, 不需要邻节点的一致性信息, 但会传输协同信息到其他节点。

3)编队可靠性

此编队策略较灵活, 因为只需通过与邻节点交互信息并计算控制, 所以扩展性较好, 同时也能容忍部分节点和通信故障<sup>[12]</sup>。时延、信息发送频率和连通性会影响编队的稳定性。时延和控制信息发送频率等对编队的影响是重要的研究点。

6.4 小结

分布式系统中一致性问题比较广泛, 基于一致性的策略可以与其他分布式策略结合使用。文献[75]将一些情况的领导跟随者策略、基于行为的策略和虚拟结构的策略归类到了基于一致性策略中的特殊情况。基于一致性的策略中, 信息交互的是邻节点信息, 所以对多跳时延的影响不大, 但会影响一致性的收敛速度。一般要求保证通信交互拓扑图的连通, 即通信拓扑图存在生成树, 一些研究提出需要静态强连通的拓扑, 也有研究表明只需动态的连通拓扑, 还有研究表明交互图只需足够频繁地存在生成树就能保证取得一致性<sup>[74, 80]</sup>。在一定通信交互频率下一致性收敛速度的研究, 以及为达到一定的收敛速度所要求的通信交互要求和时延要求的研究, 是基于一致性策略中的一些挑战性问题。

7 基于行为的策略

7.1 定义

对于基于行为的编队控制策略, 首先需要定义一些行为, 如碰撞避免、编队保持和目标追踪等, 然后根据相应行为的加权和得到最终控制  $H_i$ , 比如<sup>[12, 72, 81]</sup>:

$$u_i = \alpha_i^a u_i^a + \alpha_i^f u_i^f + \alpha_i^g u_i^g, i \in N$$

(24)

其中,  $u_i^a, u_i^f, u_i^g$  分别对应碰撞避免、编队保持和目标追踪行为的控制, 且其权重  $\alpha_i^a, \alpha_i^f, \alpha_i^g \geq 0$ 。

可将此策略中的控制分为两类: 1) 群体行为控制, 如保持编队结构、按路线飞行和目标跟踪等, 控制目标是整个群体; 2) 个体行为控制, 个体行为一般根据周围环境信息触发, 如根据周围邻节点和障碍物信息产生碰撞避免、绕过障碍物等行为。群体行为的产生需要各个节点做出相应的个体行为, 个体行为会导致群体行为。一些行为控制策略模拟了鸟群、蚁群和鱼群等生物群体的行为<sup>[81-83]</sup>。当有多个目标时, 使用基于行为的策略可以很自然地实现, 并且邻节点间都需要相互的反馈信息。然而, 多个行为若同时触发, 则可能产生干扰, 并产生无法预料的行为结果, 且较难对此策略进行理论分析<sup>[10]</sup>。

7.2 相关研究

文献[84]提出了一种基于视觉和行为的强化学习控制机制, 用于无人机的碰撞避免。文献[72]提出了一个组合了基于行为的和虚拟结构的无人机编队控制策略, 基于行为的方

编队保持和重组要求保证通信组网的连通性, 节点间通过与邻节点交互状态信息达到一致的状态。编队结构可通过设定相应的一致性信息来取得, 比如编队中心位置和相对于编队中心的位置<sup>[12]</sup>。文献[8]中通过与邻节点的相对位置来定义编队结构。交互信息方式与势函数方法类似, 各个节点将自己的信息广播到周围邻节点。然而, 多跳时延可能影响一致性收敛的速度。与时延类似, 信息发送频率也会对编队的稳定性和收敛速度产生一定影响。

法能减少数据更新的需求并提高碰撞避免的能力。文献[82]提出了一种基于行为的无人机编队稳定算法。文献[85]使用了图论和人工势场理论对鸽群进行建模,并提出了一种基于鸽群行为机制的无人机编队控制方法。文献[86]针对具有虚拟领航者的无人机编队跟踪问题,提出了一种蜂拥算法,蜂拥包括 3 条基本规则或行为:分离、聚合和速度匹配。

7.3 通信与组网需求

如图 8 所示,基于行为的控制策略也要求与周围邻节点交互信息,且一般有  $h_i = \{S_j | j \in \mathcal{N}_i\}$ ,因此通信拓扑  $\mathcal{G} = G$ 。

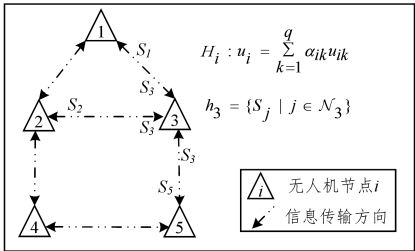


图 8 基于行为策略的编队拓扑

Fig. 8 Formation topology of behavior based approach

1) 编队保持和重组

需要通信拓扑连通,各节点通过邻节点的相对位置和(单跳)广播的信息产生相应的行为。编队保持和重组的控制需要根据编队需求产生相应的控制,如跟随某领导节点、保持与邻节点的相对距离和保持相对于编队中心的相对位置等。

2) 任务更新

需要将任务信息或命令广播到所有节点,或者间接地通过一致性来达到使所有节点更新其行为,也可设置领导节点即结合领导跟随者策略减小任务的更新复杂性。

3) 编队可靠性

编队较灵活,可扩展性好,同样是分布式策略能容忍部分通信和节点故障。适用于多目标任务。

7.4 小结

此编队策略比较灵活但群体行为可能表现出无法预料的结果,一般也要求通信拓扑连通,但能容忍一定间断性的链接。因为控制是不同行为的控制的加权和,不同行为的控制可利用前文讨论到的控制策略,比如使用势函数策略实现避免碰撞等。基于行为的编队控制策略可用于无人机蜂群的编队控制中,能模拟鸟群和鱼群的行为,灵活且迅速地控制编队移动。

8 总结

表 1 总结了不同编队控制策略的特点和通信组网的要求。在实际情况中可根据应用要求结合不同的编队策略使用,多种编队策略组合使用可以充分利用不同策略的特点<sup>[8,10,38,87]</sup>。一般而言,集中式策略实现较简单,但对通信量和计算量的要求较高,且存在单点故障问题;分布式控制策略较灵活,扩展性好,但同样有一定的通信要求。

表 1 编队控制策略对比

Table 1 Comparison of formation control approaches

编队策略	基于势函数的策略	领导跟随者策略	虚拟结构策略	基于一致性的策略	基于行为的策略
特点	根据邻节点和环境信息相关势函数得到控制	跟随节点根据领导节点的状态信息得到相应控制	节点根据虚拟结构相应位置移动	根据自己和邻节点状态信息调整状态	节点按各行为控制的权重和得到相应控制
所需控制信息 $h_i$	邻节点位置 $P_j$	领导节点状态 $S_L$	期望状态 $s_i^d$	邻节点协同变量 $\xi_j$	邻节点状态 $S_j$
控制信息传播范围	邻节点	所有跟随节点	所有节点	邻节点	邻节点
任务更新消息传播范围	所有节点	领导节点	控制节点	部分/所有节点	部分/所有节点
编队控制拓扑	网状	树型	树型/环	网状/树型	网状/环
对时延的需求	只需单跳传输,时延影响较小	需要多跳传输,时延影响较大	需要多跳传输,时延大可能破坏编队	只需单跳邻节点信息,时延影响较小	时延对群体行为反应影响大,对个体行为控制影响小
可扩展性	增加节点对编队的影响小	领导节点可能有单点故障,增加节点会导致时延增加	增加节点导致计算量增大,控制节点可能导致单点故障	增加节点导致时延增加,收敛速度可能变慢	与具体行为有关

基于势函数的策略和一些基于行为的策略比较灵活,碰撞避免的实现比较简单,可用于复杂环境中。领导跟随者和虚拟结构策略能简单地实现一定的编队结构。领导跟随者策略中的领导节点可使用性能和装备较好的无人机,以提高编队的可靠性;而跟随节点使用较简易的无人机,以在不影响任务要求的情况下减少编队成本。虚拟结构可以较容易地实现较复杂的编队结构,但如果是集中控制,计算量和通信量的要求都较高,扩展性较差。具体的应用情况可根据具体需求组合多种策略,以利用不同策略的特点实现符合多种要求的编队控制策略。领导跟随者策略和虚拟结构策略适用于节点数不太多的情况,因为如果编队太大,从领导节点或控制节点到一些节点的传输跳数就较多,时延太大,从而影响编队,同时

也有时延差的问题。

总之,无人机自组网中,组网通信与编队控制需要综合考虑。节点和通信容错是无人机自组网编队中的基本要求,编队的抗干扰能力及容错能力是编队可靠性的重要表现。无人机自组网编队的保持和重组中需要考虑各节点时延及时延差的问题,编队重组时如何避免碰撞及优化是编队重组设计中需要考虑的问题。任务信息传输的时延和传输方式也是研究中需要考虑的一个问题。

9 发展前景与研究方向

不同的编队策略使用的编队通信拓扑可能不同,比如领导跟随者策略需要一棵生成树,虚拟结构策略<sup>[67]</sup>和基于行为



的策略可以是双向环,而基于一致性的策略中的拓扑只需存在生成树即连通<sup>[17]</sup>。不同的策略也可组合使用,比如领导跟随者策略、虚拟结构策略和基于行为的策略能统一为基于一致性的策略<sup>[75]</sup>。无人机编队中的节点移动性强,通信拓扑变化频繁,以及节点通信可能出现故障等特点,给编队中的通信组网带来了很多问题和挑战。不同应用环境下的编队通信要求可能不同,比如在树林等障碍物密集的环境下执行任务需要尽量小的时延以迅速避免障碍物;而在建筑物内执行任务时可能接收不到 GPS 信号,并且墙也会削弱无人机间和无人机与基站间的通信信号,这就需要更可靠的组网策略。无 GPS 也会给无人机编队的导航<sup>[88]</sup>、目标侦察<sup>[89]</sup>和路线规划<sup>[90]</sup>等研究带来很多问题。文献[16]的研究结果表明,位置信息不精确时也能取得一定的编队结构。当无 GPS 信号时,也可以利用传感器测量节点间的相对位置来实现编队<sup>[61,64]</sup>。未来可以从以下几个方面来研究无人机编队中的通信组网技术。

1)优化编队中的编队拓扑。在编队中加入拓扑优化和重组策略,利用最小生成树或最短路等技术优化编队通信拓扑,以满足应用和编队的时延需求或者优化通信开销。比如,领导跟随者策略中所需的树型通信拓扑可以考虑总通信开销最小,同时要满足从领导节点到各节点的时延要求;虚拟结构策略中,也可以考虑从控制节点到各节点的通信开销以优化传输拓扑。对于其他策略,即  $\mathcal{G}=G$  的情况,在实际应用中,因为要考虑信道的占用或冲突,所用的也是部分通信链路或者切换使用不同链路,所以同样可以考虑涉及信道分配的拓扑优化。

2)节点和通信故障容错。由于无人机节点速度快且受障碍物的影响,因此无人机可能会出现故障,相对距离过大也可能使链接断开。因此,需要有相应的容错机制来保证编队能够继续执行任务。当这些故障发生后,要保证拓扑连通性并保持编队,并且也要考虑避免碰撞的发生。领导跟随者策略中因存在领导节点,所以可能会出现单点故障问题,对此可以考虑用其他节点替换领导节点,但这也会带来新的挑战,比如在切换领导节点时如何保持编队。在集中式的虚拟结构策略中,由于中心控制节点的存在,也存在单点故障问题,对此可以将其分布式化,或组合其他分布式策略,以增强编队的可靠性。

3)为优化应用数据传输设计相应的编队结构。不同的应用有不同的数据通信要求,比如实时性、通信带宽、可靠性等。可通过设计相应的编队策略来最大化数据传输带宽,优化传输拓扑,满足特定应用的 QoS 要求等。如何权衡控制信息传输和数据传输也是一项挑战,在一些编队中,控制信息的时延影响较大,特别是需要多跳传输的情况;在一些特殊情况下,比如编队重组或其他紧急情况下,为了编队的稳定并避免碰撞,可以考虑提高控制信息的优先性。

4)在一些约束条件下的编队和组网研究,比如时延约束、带宽约束、能耗约束和时间约束等<sup>[91-92]</sup>。某些应用数据的传输要求较严格的时延约束和带宽约束,同时编队的控制信息可能也有时延的约束,数据传输也可能有时延抖动的限制要求。编队重组时,在规定时间内完成重组也是一个挑战性问题。在一些情况下,还可能有时延或能耗的约束要求。

5)低能耗的编队控制策略研究。无人机蜂群中各节点的

能力有限,特别是要考虑能源的限制。能耗是无人机蜂群中需要重点考虑的因素,因而低耗的编队控制策略对于延长无人机蜂群的续航时长尤为重要。集中式控制策略中,中心控制节点的计算量要求很大,耗能也较快,对此可以考虑依次切换控制节点,以均匀利用各节点的能源。分布式编队策略中,简单地跟随前一个节点是一种能减少计算的低耗能策略,但会影响编队结构和稳定性。低耗的编队也可以从减少重组和优化飞行路线等方面考虑。

6)编队控制策略与通信组网性能的影响关系。不同编队控制策略对网络性能的要求不同,因此可以研究不同网络性能下编队的效果。不同的通信组网性能对编队会产生不同影响,如何合理调整传输控制信息的频率并保证时延要求是一项挑战。比如,在基于一致性的策略中,若时延过大或控制信息传输时间的间隔太大,就可能影响编队的收敛速度,即需要较长时间才能实现期望的编队结构。通信组网性能也与编队结构有关,不同编队策略在不同编队结构中有不同的性能。

7)无人机自组网智能编队系统的研究。环境的复杂性和不确定性给无人机自组网系统的研究带来了很大的挑战,演化计算、强化学习和博弈论等技术能有效应对复杂环境和不确定性因素。有研究<sup>[11,13,93-94]</sup>基于遗传算法、差分进化和粒子群优化等基于演化计算或仿生计算<sup>[95]</sup>的思想设计了无人机群体智能系统编队策略。文献[96]讨论了 multi-agent 系统中强化学习的相关研究。文献[97]中提出了一个用于无人机系统的强化学习控制模型。无人机自组网中可利用这些技术提高编队的灵活性和可靠性,同时也可用于优化通信组网结构。

**结束语** 多无人机协同执行任务比单个无人机更有效、可靠,并能容忍一些节点故障。然而在无人机编队中,各节点的移动性强,通信拓扑可能频繁变化,这给无人机间的组网和通信研究带来了很多问题和挑战。不同的编队策略对通信要求不一样,我们根据相关研究,分析并总结了 5 种基本编队策略的特点和对通信组网的要求。5 种编队控制策略为:基于势函数的策略、领导跟随者策略、虚拟结构策略、基于一致性的策略和基于行为的策略。不同编队策略有不同的特点和适用情况,通信组网技术的设计可利用无人机编队的一些特点,比如可以迅速变换拓扑结构,同时无人机编队也会给通信组网带来很多问题和挑战。无人机编队与其通信组网间的协调和优化问题还有很大的研究空间。

参 考 文 献

[1] GUPTA L,JAIN R,VASZKUN G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2016,18(2):1123-1152.

[2] BEKMEZCI I,SAHINGOZ O K,TEMEL S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey[J]. Ad Hoc Networks,2013,11(3):1254-1270.

[3] SEMSCH E,JAKOB M,PAVLICEK D,et al. Autonomous UAV Surveillance in Complex Urban Environments [C] // IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. Milan,Italy,2009:82-85.

[4] CASBEER D W,BEARD R W,MCLAIN T W,et al. Forest Fire

- Monitoring with Multiple Small UAVs[C]//Proceedings of the 2005 American Control Conference, Portland, OR, USA, 2005: 3530-3535.
- [5] CASBEER D W, KINGSTON D B, BEARD R W, et al. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles[J]. International Journal of Systems Science, 2006, 37(6): 351-360.
- [6] TOMIC T, SCHMID K, LUTZ P, et al. Toward a fully autonomous UAV: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(3): 46-56.
- [7] BUPE P, HADDAD R, RIOS-GUTIERREZ F. Relief and Emergency Communication Network based on an Autonomous Decentralized UAV Clustering Network[C]//Southeast Con 2015, FL, USA, 2015: 1-8.
- [8] LIAO F, TEO R, WANG J L, et al. Distributed Formation and Reconfiguration Control of VTOL UAVs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 270-277.
- [9] LAFFERRIERE G, WILLIANMS A, CAUGHMAN J, et al. Decentralized control of vehicle formations[J]. Systems & Control Letters, 2005, 54(9): 899-910.
- [10] BEARD R W, LAWTON J, HADAEGH F Y. A Coordination Architecture for Spacecraft Formation Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(6): 777-790.
- [11] DUAN H, LUO Q, MA G, et al. Hybrid Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for Multi-UAV Formation Reconfiguration[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2013, 8(3): 16-27.
- [12] SEO J, KIM Y, KIM S, et al. Consensus-based reconfigurable controller design for unmanned aerial vehicle formation flight[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(7): 817-829.
- [13] LI X, ZHANG X, LIU H, et al. Formation Reconfiguration Based on Distributed Cooperative Coevolutionary for Multi-UAV[C]//12th World Congress on Intelligent Control and Automation, Guilin, China, 2016: 2308-2311.
- [14] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [15] XIE J, WAN Y, KIM J H, et al. A Survey and Analysis of Mobility Models for Airborne Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1221-1238.
- [16] JAFARIAN M, PERSIS C D. Formation control using binary information[J]. Automatica, 2015, 53: 125-135.
- [17] WANG G, LUO H, HU X, et al. Fault-tolerant communication topology management based on minimum cost arborescence for leader-follower UAV formation under communication faults[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(2): 1-17.
- [18] YANG H, JIANG B, ZHANG Y. Fault-tolerant Shortest Connection Topology Design for Formation Control[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2014, 12(1): 29-36.
- [19] OH K K, PARK M C, AHN H S. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53: 424-440.
- [20] LIU S, XIE L, ZHANG H. Distributed consensus for multi-agent systems with delays and noises in transmission channels[J]. Automatica, 2011, 47(5): 920-934.
- [21] ZHOU J, WANG Q. Convergence speed in distributed consensus over dynamically switching random networks[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1455-1461.
- [22] NI W, CHENG D. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(3): 209-217.
- [23] LIU C L, TIAN Y P. Formation control of multi-agent systems with heterogeneous communication delays[J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(6): 627-636.
- [24] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [25] LIU Y, JIA Y. Robust formation control of discrete-time multi-agent systems by iterative learning approach[J]. International Journal of Systems Science, 2015, 46(4): 625-633.
- [26] MEI Q, YAO P Y. An Overview of Consensus-Based Formation Control for Multi-Agent System[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(1): 54-57. (in Chinese)  
梅权, 姚佩阳. 一致性 Multi-Agent 编队控制综述[J]. 电光与控制, 2017, 24(1): 54-57.
- [27] WANG P, YAO P Y. Method of Distributed UAVs Formation with Time-delay[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(9): 181-183. (in Chinese)  
王品, 姚佩阳. 存在时延的分布式无人机编队控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 181-183.
- [28] ZONG Q, WANG D D, SHAO S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14. (in Chinese)  
宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14.
- [29] LI W, CHEN J. Review and Prospect of Cooperative Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Formation[J]. Aerospace Control, 2017, 35(3): 90-96. (in Chinese)  
李文, 陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J]. 航天控制, 2017, 35(3): 90-96.
- [30] LI X M, BO N, DAI J J, et al. Survey on Key Techniques of the Collaborative Operational Command and Control of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Formation[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(9): 29-35. (in Chinese)  
李相民, 薄宁, 代进进, 等. 有/无人机编队协同作战指挥控制关键技术综述[J]. 飞航导弹, 2017(9): 29-35.
- [31] JIAO L G, SHI P F, WEI W L. Research on Fuzzy PID Control of UAV Formation Flight[J]. Computer Simulation, 2015, 32(9): 66-71. (in Chinese)  
焦林冠, 石鹏飞, 魏文领. 基于模糊 PID 的无人机编队控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 66-71.
- [32] WANG X, ZHANG D B, SHEN L C. A Virtual Force Based Path Following Approach for Unmanned Aerial Vehicles[J]. Robot, 2016, 38(3): 329-336. (in Chinese)  
王勋, 张代兵, 沈林成. 一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制

- 方法[J]. 机器人, 2016, 38(3): 329-336.
- [33] WANG P, YAO P Y, MEI Q, et al. Distributed formation control method of UAVs based on flocking[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(2): 42-46. (in Chinese)  
王品, 姚佩阳, 梅权, 等. 一种基于蜂拥策略的分布式无人机编队控制方法[J]. 飞行力学, 2016, 34(2): 42-46.
- [34] HAO B, QIN L J, WENG Z F. Research on Formation Control for Hybrid Multi-robot Based on Leader-Follower[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(4): 5-7. (in Chinese)  
郝博, 秦丽娟, 翁志锋. 基于 leader-follower 的混合式多机器人编队控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(4): 5-7.
- [35] ZHANG J X, ZHANG M. Design of Leader-Follower Formation Controller for Nonholonomic Mobile Robots [J]. Intelligent Computer and Applications, 2011, 1(6): 20-22. (in Chinese)  
张金学, 掌明. 非完整机器人 Leader-follower 编队控制器设计[J]. 智能计算机与应用, 2011, 1(6): 20-22.
- [36] DONG X, YU B, SHI Z, et al. Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(1): 340-348.
- [37] SEN A, SAHOO S R, KOTHARI M. Cooperative Target-centric Formation Control without Relative Velocity Measurements under Heterogeneous Networks[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2017, 87(3/4): 683-698.
- [38] REN C E, CHEN L, CHEN P C L. Adaptive Fuzzy Leader-Following Consensus Control for Stochastic Multiagent Systems with Heterogeneous Nonlinear Dynamics[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 25(1): 181-190.
- [39] WANG X, ZENG Z, CONG Y. Multi-agent distributed coordination control: Developments and directions via graph viewpoint [J]. Neurocomputing, 2016, 199: 204-218.
- [40] BRANDAO A S, BARBOSA J P A, MENDOZA V, et al. A Multi-Layer Control Scheme for a Centralized UAV Formation [C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Orlando, FL, USA, 2014: 1181-1187.
- [41] KESHMIRI S, PAYANDEH S. A Centralized Framework to Multi-robots Formation Control: Theory and Application[M]// Collaborative Agents-Research and Development. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 85-98.
- [42] REN W, ATKINS E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(10/11): 1002-1033.
- [43] DONG W, FARRELL J A. Consensus of multiple nonholonomic systems[C]//Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun, Mexico, 2008: 2270-2275.
- [44] DONG W, FARRELL J A. Cooperative control of multiple non-holonomic mobile agents[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1434-1448.
- [45] WEN W, DUAN Z, REN W, et al. Distributed consensus of multi-agent systems with general linear node dynamics and intermittent communications[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(16): 2438-2457.
- [46] DIMAROGONAS D V, KYRIAKOPOULOS K J. A connection between formation infeasibility and velocity alignment in kinematic multi-agent systems[J]. Automatica, 2008, 44(10): 2648-2654.
- [47] LIN Z, FRANCIS B A, MAGGIORE M. Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(1): 121-127.
- [48] OH K K, AHN H S. Distance-based control of cycle-free persistent formations[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Denver, CO, USA, 2011: 816-821.
- [49] OH K K, AHN H S. Distance-based formation control using Euclidean distance dynamics matrix: general cases [C]//Proceedings of the 2011 American Control Conference. CA, USA, 2011: 4816-4821.
- [50] OH K K, AHN H S. Formation control of mobile agents based on inter-agent distance dynamics[J]. Automatica, 2011, 47(10): 2306-2312.
- [51] REN C E, CHEN L, CHEN C L P. Adaptive Fuzzy Leader-Following Consensus Control for Stochastic Multiagent Systems with Heterogeneous Nonlinear Dynamics[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 25(1): 181-190.
- [52] HAFEZ A T, KAMEL M A. Fault-tolerant control for cooperative unmanned aerial vehicles formation via fuzzy logic [C]//2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Arlington, VA, USA, 2016: 1261-1266.
- [53] LIN Z, LIU H H. Consensus based on learning game theory with a UAV rendezvous application [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(1): 191-199.
- [54] KIM D H, WANG H, SHIN S. Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions: Analytical design guidelines [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2006, 45(4): 369-394.
- [55] RASCHE C, STERN C, KLEINJOHANN L, et al. A Distributed Multi-UAV Path Planning Approach for 3D Environments [C]//The 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications. Wellington, New Zealand, 2011: 7-12.
- [56] ZHU B, ZAINI A H B, XIE L. Distributed guidance for interception by using multiple rotary-wing unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5648-5656.
- [57] FU Y, WANG X K, HUAN L, et al. Multi-UAV formation control method based on modified artificial physics [C]//Control and Decision Conference (CCDC). Yinchuan, China, 2016: 2523-2529.
- [58] FU Y, WANG X K, HUAN L, et al. Multi-UAV Formation Control Method Based on Modified Artificial Physics [C]//Control and Decision Conference. Lijiang, China, 2016: 2523-2529.
- [59] ZHOU Y, DONG X, ZHONG Y. Time-varying formation tracking for UAV swarm systems with switching interaction topologies [C]//Chinese Control Conference. Chengdu, China, 2016: 7658-7665.
- [60] HOU Z, FANTONI I. Distributed leader-follower formation control for multiple quadrotors with weighted topology [C]//10th System of Systems Engineering Conference. San Antonio, Texas, USA, 2015: 256-261.



- [61] DEHGHANI M A, MENHAJ M B. Communication free leader-follower formation control of unmanned aircraft systems[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 80: 69-75.
- [62] GALZI D, SHTESSEL Y. UAV Formations Control Using High Order Sliding Modes[C] // Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis. Minneapolis, Minnesota, USA, 2006: 4250-4254.
- [63] ZHANG H, ZHAO G, XU G. Time-Optimal Control for Formation Reconfiguration of Multiple Unmanned Aerial Vehicles[C] // Proceedings of the 35th Chinese Control Conference. Chengdu, China, 2016: 5630-5635.
- [64] LIU T, JIANG Z P. Distributed formation control of nonholonomic mobile robots without global position measurements[J]. Automatica, 2013, 49(2): 592-600.
- [65] SADOWSKA A, HUIJBERTS H, NIJMEIJER H, et al. A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling[J]. International Journal of Control, 2011, 84(11): 1886-1902.
- [66] KIM S, KIM Y. Three Dimensional Optimum Controller for Multiple UAV Formation Flight Using Behavior-based Decentralized Approach[C] // International Conference on Control, Automation and Systems. COEX, Seoul, Korea, 2007: 1387-1392.
- [67] REN W, BEARD R W. Decentralized Scheme for Spacecraft Formation Flying via the Virtual Structure Approach[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(1): 73-82.
- [68] LI N H M, LIU H H T. Formation UAV Flight Control using Virtual Structure and Motion Synchronization[C] // American Control Conference. Seattle, Washington, USA, 2008: 1-19.
- [69] PETERSON C K, BARTON J. Virtual structure formations of cooperating UAVs using wind-compensation command generation and generalized velocity obstacles[C] // IEEE Aerospace Conference. MT, USA, 2015: 1-7.
- [70] SHAO Z, ZHU X P, ZHOU Z, et al. Distributed formation keeping control of UAVs in 3-D dynamic environment[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 1065-1072. (in Chinese)  
邵壮, 祝小平, 周洲, 等. 三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1065-1072.
- [71] YUAN J, TAGN G Y. Formation control of autonomous underwater vehicles with consensus algorithms and virtual structure[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2011, 6(3): 248-253. (in Chinese)  
袁健, 唐功友. 采用一致性算法与虚拟结构的多自主水下航行器编队控制[J]. 智能系统学报, 2011, 6(3): 248-253.
- [72] CAI D, SUN J, WU S. UAVs Formation Flight Control Based on Behavior and Virtual Structure[J]. Communications in Computer and Information Science, 2012, 325(3): 429-438.
- [73] REN W, BEARD R W, ATKINS E M. A Survey of Consensus Problems in Multi-agent Coordination[C] // American Control Conference. Portland, OR, USA, 2005: 1859-1864.
- [74] SU S, LIN Z. Distributed Consensus Control of Multi-Agent Systems With Higher Order Agent Dynamics and Dynamically Changing[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(2): 515-519.
- [75] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 505-512.
- [76] VEGA-ALONZO A, GUERRERO-CASTELLANOS J F, DURAND S, et al. Event-based control strategy for consensus of a group of VTOL-UAVs[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Event-Based Control, Communication, and Signal Processing. Krakow, Poland, 2016: 1-8.
- [77] DING Y, WEI C, BAO S Y. Formation control for multiple UAVs with time delay based on consensus algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(S1): 151-155. (in Chinese)  
丁衍, 魏晨, 鲍树语. 基于一致性算法的时延多无人机编队分散化控制[J]. 计算机应用, 2014, 34(S1): 151-155.
- [78] ZHU X, ZHANG X X, YAN M D, et al. UAV Formation Control Strategy Based on Consensus[J]. Computer Simulation, 2016, 33(8): 30-34. (in Chinese)  
朱旭, 张逊逊, 闫茂德, 等. 基于一致性的无人机编队控制策略[J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 30-34.
- [79] XIONG T, CAO K C, CHAI Y, et al. Consensus Algorithm with Input Constraint based Formation Control for Multiple UAVs[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(12): 1-8. (in Chinese)  
熊涛, 曹科才, 柴运, 等. 基于输入约束一致性算法的多无人机编队控制[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(12): 1-8.
- [80] ANTONELLI G, ARRICHELLO F, CACCAVALE F, et al. Decentralized time-varying formation control for multi-robot systems[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(7): 1029-1043.
- [81] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-Based Formation Control for Multi-robot Teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [82] BANDALA A A, VICERRA P R R, DADIOS E P. Formation Stabilization Algorithm for Swarm Tracking in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadrotors[C] // IEEE Region 10 Annual International Conference on TENCON. Bangkok, Thailand, 2015: 1-6.
- [83] BANDALA A A, DADIOS E P, VICERRA P R R, et al. Swarm Behavior for Aggregation, Foraging, Formation, and Tracking[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2014, 18(5): 745-751.
- [84] MA Z, NIU Y, SHEN L. Vision-Based Behavior for UAV Reactive Avoidance by using a Reinforcement Learning Method[C] // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation. Guilin, China, 2016.
- [85] QIU H X, DUAN H B, FAN Y M. Multiple Unmanned Aerial Vehicle Autonomous Formation based on the Behavior Mechanism in Pigeon Flocks[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1298-1304. (in Chinese)  
邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298-1304.
- [86] WANG P, YAO P Y, MEI Q, et al. Distributed Formation Control Method of UAVs based on Flocking[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(2): 42-46. (in Chinese)  
王品, 姚佩阳, 梅权, 等. 一种基于蜂拥策略的分布式无人机编队控制方法[J]. 飞行力学, 2016, 34(2): 42-46.

services towards disaster communication system[C]//2017 24th International Conference on Telecommunications (ICT). Limasol;IEEE,2017;1-5.

[26] TANG L, LONG Y H, CHEN Q B, et al. Multi-objective Optimization of Cross-Layer Resource Allocation in Cooperative Relay Systems [J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2011, 29(4): 331-339. (in Chinese)  
唐伦, 龙叶华, 陈前斌, 等. 协作中继系统多目标联合的跨层资源分配 [J]. 应用科学学报, 2011, 29(4): 331-339.

[27] NUNES I O, MELO P O S V D, LOUREIRO A A F. Leveraging D2D multihop communication through social group meeting awareness[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(4): 12-19.

[28] JIANG L, TIAN H, XING Z, et al. Social-aware energy harvesting device-to-device communications in 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(4): 20-27.

[29] WANG W, WU X, XIE L, et al. Joint storage assignment for D2D offloading systems [J]. Elsevier Computer Communications, 2016, 83(C): 45-55.

[30] KHOSHKHOLGH M G, NAVAIE K, KANG G S, et al. Cell Association in Dense Heterogeneous Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, PP(99): 1-1.

[31] GADAM M A, NG C K, NORDIN N K, et al. Hybrid Channel Gain Access Cell Association for Load Balancing in Downlink LTE-Advanced HetNets [C] // International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 337-342.

[32] SUN Y, FENG G, QIN S, et al. User Behavior Aware Cell Association in Heterogeneous Cellular Networks [C] // 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco: IEEE, 2017: 1-6.

[33] CHENG T F. Research on Outage Performance of D 2 D Relay Communication in Multi-Band Cellular Network [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)  
程腾飞. 多带蜂窝网中 D2D 中继通信的中断性能研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

[34] PAN J Y, HSU M H. Relay selection of relay-assisted Device-to-Device and uplink communication underlying cellular networks [C] // International Conference on Computing, Networking and Communications. IEEE, 2017: 980-985.

[35] LIU F B. Research on Device to Device Relay Selection Strategy in LTE-Advanced Network [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)  
刘峰波. 基于 LTE-A 的 D2D 中继选择策略的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[36] MA R, CHANG Y J, CHEN H H, et al. On Relay Selection Schemes for Relay-Assisted D2D Communications in LTE-A Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, PP(99): 1-1.

[37] CHEN Z, ZHAO H Y, CAO Y, et al. Load balancing for D2D-based relay communications in heterogeneous network [C] // International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Mumbai: IEEE, 2015: 23-29.

[38] ZORZI M, RAO R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad hoc and Sensor Networks: Multihop Performance [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(4): 337-348.

[39] XU C, SONG L, HAN Z, et al. Interference aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction [C] // 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa: IEEE, 2012: 445-449.

[40] LIU J J, KAWAMOTO Y C, NISHIYAMA H. Device-to-Device Communications Achieve Efficient Load Balancing in LTE-Advanced Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(2): 57-65.

---

(上接第 12 页)

[87] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based Cooperative Formation Control with Collision Avoidance for a Multi-UAV System [C] // American Control Conference. Portland, Oregon, USA, 2014: 2077-2082.

[88] LIU M. UAV integrated navigation system under GPS failure [J]. Journal of University of Jinan (Science & Technology), 2015, 29(2): 129-132. (in Chinese)  
柳明. GPS 失效下的无人机组组合导航系统 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2015, 29(2): 129-132.

[89] VANEGAS F, DUNCAN C, EICH M, et al. UAV Based Target Finding and Tracking in GPS-Denied and Cluttered Environments [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016: 2307-2313.

[90] KIM H J, KWON J W, SEO J. Multi-UAV-Based Stereo Vision System without GPS for Ground Obstacle Mapping to Assist Path Planning of UGV [J]. Electronics Letters, 2014, 50(20): 1431-1432.

[91] HONG Y, HUANG W, CHIU F, et al. Cooperative communications in resource-constrained wireless networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 47-57.

[92] DECHTER R. Constraint Networks [J]. Artificial Intelligence, 1992, 49(89): 61-95.

[93] CHI T Z, CHENG H, PAGE J R, et al. Evolving Swarm of UAVs [J]. Advances in Aircraft and Spacecraft Science, 2014, 1(2): 219-232.

[94] WANG X H, DUAN H B. Biologically adaptive robust mean shift algorithm with Cauchy predator-prey BBO and space variant resolution for unmanned helicopter formation [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(11): 1-13.

[95] DUAN H, LI P. Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014.

[96] BUSONI L, BABUSKA R, SCHUTTER B D. A Comprehensive Survey of Multiagent Reinforcement Learning [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2008, 38(2): 156-172.

[97] ZENG Y, GUIXIANG W, BO X. A Basal Ganglia Network Centric Reinforcement Learning Model and Its Application in Unmanned Aerial Vehicle [J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2018, 10(2): 290-303.