



计算机科学

Computer Science

ISSN 1002-137X, CN 50-1075/TP

《计算机科学》网络首发论文

题目: 大规模无人机自组网分层体系架构研究综述
作者: 游文静, 董超, 吴启晖
收稿日期: 2019-09-24
网络首发日期: 2020-05-13
引用格式: 游文静, 董超, 吴启晖. 大规模无人机自组网分层体系架构研究综述. 计算机科学. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20200512.2121.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大规模无人机自组网分层体系架构研究综述



游文静 董超 吴启晖

(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业与信息化部重点实验室 南京 210016)

(youwenjing@nuaa.edu.cn)

摘要 近年来，随着电子与通信等技术的发展，无人机趋于小型化，以蜂群为代表的大规模无人机集群得到了工业界与学术界的广泛关注。考虑到日益复杂的任务与应用环境，自主集群成为大规模无人机集群的重要发展方向。为了实现自主控制，能够提供高效灵活的机间通信的无人机自组网成为关键，然而，大规模无人机集群给无人机自组网的资源分配、信道接入以及网络路由等带来了一系列的挑战，分层的体系架构可以有效应对上述挑战。文中首先分别介绍了分簇与联盟这两类大规模无人机自组网常见的分层架构的研究现状，分析了各类分簇算法以及联盟适合的应用场景；然后，对两类分层架构进行了对比研究；最后，讨论了大规模无人机自组织网络分层体系架构未来的研究方向。

关键词： 无人机分层体系架构；分簇；联盟；自主性

中图法分类号 TN929 **文献标识码** A DOI:10.11896/jsjxx.190900164

Survey of Layered Architecture in Large-scale FANETs

YOU Wen-jing DONG Chao and WU Qi-hui

(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract In recent years, with the development of electronic and communication technologies, UAVs tend to be miniaturized, large-scale Unmanned Aerial Vehicle (UAV) formations represented by UAV swarms have attracted the attention of industry and academia. Considering the increasingly complex tasks and

到稿日期：2019-09-24 返修日期：2019-12-12

基金项目：国家重点研发计划(2018YFB1800801)；国家自然科学基金(61631020, 61827801, 61931011)

This work was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFB1800801) and National Natural Science Foundation of China (61631020, 61827801, 61931011).

通讯作者：董超 (dch@nuaa.edu.cn)

application environment, autonomous UAV formations are become an important development direction. In order to realize the autonomous control of the formation, the Flying UAV Ad hoc Networks (FANETs) which can provide efficient and flexible communication among the UAVs becomes critical. However, large-scale brings a series of challenges to resource allocation, channel access and network routing of FANETs, and the layered architecture can effectively deal with these challenges. Firstly, this paper introduced the research status of two kinds of common layered architectures including clustering and alliance, analyzed the application environments for both architectures. And then this paper made a comparative study of the two kinds of architectures. Finally, the potential research directions in the future was discussed in details.

Key Words: UAV layered architecture, Cluster, Alliance, Autonomy

1 引言

近年来, 无人机在军用和民用领域的应用越来越广泛, 如协同侦察^[1-4]、精准农业^[5-6]、灾害管理^[7-9]、环境监测^[10-11]、空中基站^[12-13]等。在无人机技术的发展过程中, 人们逐步意识到, 单架无人机的任务完成可靠性不够高, 且受自身的能量、能力以及载荷等因素的限制, 难以完成复杂的工作任务, 因此多无人机协同作业成为趋势。随着电子技术的发展, 无人机呈现小型化趋势, 以蜂群为代表的大规模无人机集群成为当下的研究热点。

面对复杂的任务以及动态不确定的环境, 无人机集群有时会出现通信中断、操作失灵等紧急情况。例如, 由于集群受到干扰, 2018 年西安城墙无人机灯光秀的表演就出现了瑕疵^[14]。因此, 面向未来可能的各类环境与应用需求, 需要无人机集群能够智能判断工作环境, 自主调整和控制无人机的行为以保证工作任务的完成^[15], 即无人机自主集群, 它们将具有动态自愈合能力, 以实现信息高速共享、故障自修复和环境自适应, 通过无人机之间的信息交互有效解决多无人机之间的冲突问题, 能以低成本、高度分散的形式完成动态环境下的复杂任务, 满足功能需求。

要实现自主集群, 就要求高效可靠的机间协同通信。传统的无人机集群协同方式, 如预先配置和实时集中控制, 对空地链路的要求和依赖较高, 一旦链路受到干扰或者无人机不在基站通信范围内, 机间协同将无法实现。因此, 不依赖固定基础设施的无人机自组网(Flying Ad Hoc Network,

FANET)^[16-17]成为实现大规模无人机自主集群的关键技术。

它以无人机作为网络节点来相互转发数据, 无人机之间可以协商完成协同操作并自主构建网络, 去中心化的网络结构可以实现信息高速共享和自治, 支持节点动态加入和退出网络, 从而满足无人机集群大规模、高动态情况下的协同通信需求, 也适用于解决各种复杂和特殊环境下的网络通信。

如上文所述, 大规模是无人机集群发展的趋势, 但大规模给无人机自组网的资源分配、信道接入以及网络路由等带来不小的挑战。要应对大规模, 首先要解决网络体系架构问题。同多数自组织网络类似, 无人机自组织网络体系架构^[18]可分为平面结构和分层结构。平面架构组织简单, 但可扩展性不强, 更加适合中小规模的网络; 分层架构相比于平面结构, 可扩展性更强, 适用于大规模无人机自组织网络, 但其构成相对复杂。虽然在传统自组织网络以及车联网中有大量分层体系架构的研究结果, 但大规模无人机自组网具备三维立体、资源动态稀缺等独有的特点^[19], 导致这些研究成果无法直接应用, 需要对大规模无人机自组织网络的分层架构进行专门研究。

本文主要贡献如下: 1) 当前有关大规模无人机自组网技术的综述文章^[1,16,20-22]主要从 MAC 层协议、网络层的路由协议、节点移动模型、应用场景等方面进行总结, 而本文则是从体系架构的角度来思考如何应对大规模给无人机自组网带来的通信挑战; 2) 本文对分簇和联盟两种分层架构近几年的研究成果进行介绍和分析, 并根据无人机集群执行

任务的环境不确定性的程度,分析了分簇和联盟的适用范围;

3) 分析了下一步的研究方向。本文第 2 节介绍基于分簇的大规模无人机自组网分层架构的研究现状;第 3 节介绍基于联盟的大规模无人机自组网分层架构的研究现状;第 4 节对分簇和联盟两种架构进行了对比分析;第 5 节讨论了无人机自组网分层架构下一步的研究方向;最后总结全文。

2 基于分簇的大规模无人机自组网分层架构

分簇^[23-24]的方法可以将网络节点划分成若干个簇,每个簇由簇头和簇成员组成,簇头负责维护簇内信息传输、数据聚合以及簇间通信,簇内成员只需要完成与簇头之间的通信。分簇主要包括簇生成与簇维护两个阶段。网络建立初期,所有节点处于孤立状态。各节点根据邻居节点的消息寻找合适的簇头并加入簇。当有节点加入或离开簇、两个簇的簇头在彼此通信范围内以及簇头失效等情况发生时,将触发簇维护机制。如图 1(a)所示,无人机集群分成了 3 个簇, UAV3、UAV4、UAV9 为簇 1、簇 2 和簇 3 的 3 个簇头,其余无人机分别为这 3 个簇的簇成员,一段时间后,无人机移动改变了物理位置与通信距离,并根据新的拓扑关系进行簇维护。图 1(b)中簇 2 与簇 3 进行合并, UAV4 放弃簇头角色,成为簇 3 的成员节点。无人机的高移动性、能量有限性、机间链路的动态性以及面向任务等特征给大规模无人机自组网的分簇机制带来了新的挑战,下面将从这几个方面论述当前的研究现状。

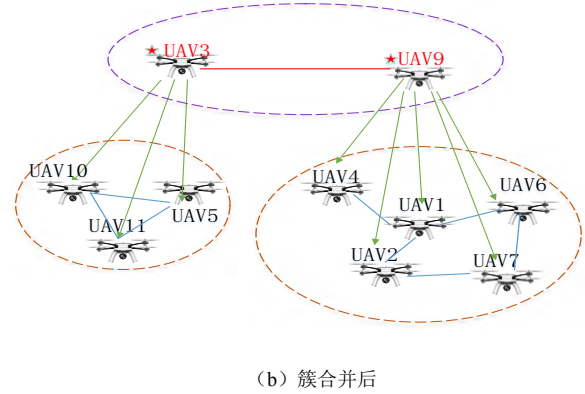
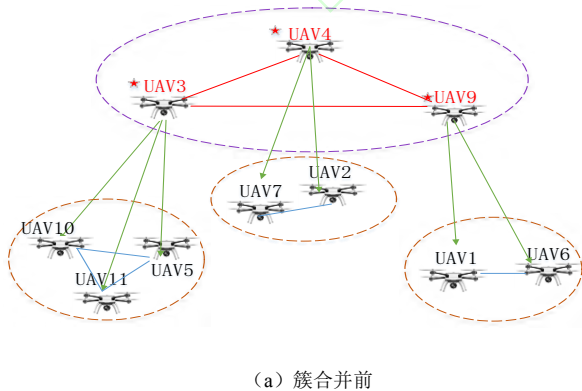


图 1 无人机簇维护过程

Fig.1 Maintenance process of UAV clustering

(1) 基于移动性的分簇算法

节点移动会改变物理位置与通信距离等,从而影响分簇。文献^[25-26]通过节点接收到的信号强度来判断节点间的相对移动性,并选择相对移动性小的节点作为簇头;文献^[27-28]通过移动预测来选择连接时间长的节点组成一个簇;文献^[29-30]通过对节点的移动控制来维持稳定的通信链路。SA-WCA^[25]根据节点的发射功率和接收功率来衡量节点之间的相对运动,其优点在于不需要计算节点之间的距离,通过收发功率的比值与距离平方成反比的定律来获得节点的相互移动,节省了 GPS 定位的能量,并且由于采样时钟周期短,节点之间的相互运动更符合节点的实时运动;SOCZBM^[26]借鉴鸟群的飞行行为,根据节点接收到簇头发送消息的信号强度来判断节点当前所处的区域,并将其分为簇头候选区、邻居节点区以及孤立状态区,并对不同区域的节点进行相应的行为调整。MPCA^[27]根据 GPS 提供的节点位置和速度信息计算出链路生存周期,采用字典 Trie 结构得到邻居节点在下一周期依然是邻居节点的概率来进行移动预测,结合节点度、链路生存周期以及邻居集的概率进行簇头选择。该算法考虑了无人机的高速移动的问题,在精确定位的前提下在高速的无人机网络中有不错的表现。MPCR^[28]预测下一次任意两点之间的连通性,选择连接性概

率较高的节点作为簇头，引入“渡轮”节点在非连接区域进行通信。VBCA^[29]和 MOOC^[30]通过用虚拟力控制节点移动的方式进行簇维护。不同的是，VBCA 应用于无人机部署与 3D 定位，目标是优化簇的立体空间覆盖体积，节点受 VSEPR 模型的排斥力与吸引力作用，最终处于拓扑结构的稳态位置。若有节点加入或离开，簇中节点将重新在力的作用下达达到新的稳态位置，因此该协议对无人机的移动有阈值要求，若移动超过该阈值，拓扑结构的稳定性被破坏，将产生大量的拓扑调整开销。而 MOOC 应用于无人机的覆盖与通信连接，采用基于领导者-跟随者的虚拟力的策略对节点的移动速度和方向进行控制，从而保持通信连接与覆盖面积平衡的稳定拓扑结构。该协议所提到的稳定拓扑结构比 VBCA 中的拓扑结构更加灵活，但是 MOOC 中只设置了一个领导节点，集群对领导节点的依赖较大，且虚拟力对节点的控制存在不确定性。

(2) 基于链路质量的分簇算法

无人机网络中节点具有高移动性，拓扑变化快，带来的直接影响就是链路的动态性，因此在分簇时也需要考虑链路质量。文献^[31]通过检测信噪比衡量链路质量，在选择簇头时考虑链路质量、邻居数量，以确保簇内和簇间的可靠通信。簇内采用群组移动模型，高移动性对簇内成员节点的影响不大，尽管簇间采用随机移动模型，路由过程中会生成周期性拓扑控制消息，使得在高动态情况下数据能可靠传输。BIMPC^[32]将多头绒泡菌的觅食模型移植到无人机网络领域，簇形成过程考虑了无人机网络中链路的数据传输能力、节点间距离对传输性能的影响、链路生存概率以及相邻无人机之间的运动稳定性，所得到的簇结构在节点高速运动的情况下平均链接时间较长，稳定性有所提升，但是簇内成员节点较少，簇的个数较多，增加了虚拟主干网的负载。

(3) 基于能耗的分簇算法

由于无人机能源有限，能量消耗的快慢决定无人机运行时间的长短，基于能耗的分簇算法应运而生。EALC^[33]中节点根据与相邻节点的位置选择最合适的功率级别来保证通信质量与能量优化的平衡，簇头的选择综合考虑了节点剩余能量、节点间平均距离以及与理想节点度的差值，通过功率控制与合理的簇头选择，降低了能量网络中的能量消耗，延长了簇的生存时间。然而，该算法没有考虑节点的相对移动性，在高速移动的场景中应用需要进行改进。BICSF^[34]采用生物群体智能的分簇方法，在萤火虫算法的基础上结合节点剩余能量、根据荧光剂测得的邻居节点位置和节点度进行簇头选择，通过能量感知进行组簇，簇结构的生命周期得到延长，且与蚁群算法^[35-36]、灰狼算法^[37]等其他生物群体智能算法相比，不需要从多个解迭代收敛到最优解，节省了无人机在复杂计算过程中的能耗。

(4) 面向任务的分簇算法

对于无人机集群而言，不同的任务需要不同的网络架构，因此，需要面向任务来设计分簇算法。TABC^[38]以簇结构作为任务分配算法的基本框架，簇头与簇成员通过集中式算法协同完成任务分配，簇头之间以分布式算法协同完成目标协调过程。簇头收集成员信息进行信息融合并记录各成员以及其他簇头的任务代价，形成任务执行表。当簇内有剩余任务时，簇头使用拍卖机制将任务分配权转移给其他簇头。该算法综合了分布式与集中式任务分配的优势，集中式能减少任务分配相互冲突的概率，避免完全分布式算法延长无人机协商的时间，同时簇间采用分布式算法能快速响应高动态环境的变化，提供系统的稳定性和可扩展性。文献^[39]提出了 3 种面向任务的无人机自组网簇头选择方案，第 1 种是随机选择，第 2 种是考虑无人机最大剩余能量，第 3 种是考虑最大剩余能量和与地面基站距离的混合方案。由于无人机在执行任务过程中因飞行和数据传输会消耗能量，因此第 3 种方案在无人机平均能耗方面更有效。DPCHA^[40]根据在移动无线

网络中提出的 KHOPCA^[41]算法进行组簇, 旨在形成稳定的通信链路, 该算法能保证在移动的情况下进行簇重构, 使得簇能快速收敛, 降低通信复杂度。该算法在无人机集群执行目标的跟踪任务中, 考虑了目标和无人机的移动性以及无人机集群的覆盖搜索性能, 将 KHOPCA 算法与双信息素蚁群模型相结合, 进而优化无人机集群完成目标跟踪任务的性能。上述算法在任务分配过程中, 簇内成员需要通过簇头进行统一分配, 缺乏灵活性。

结合上述分析得知, 在需要集群能稳定飞行的应用场景中, 比如精准农业等民用应用, 应使用基于移动性的分簇算法; 在紧急救援、战场作战等需要传输音频、视频等多媒体信息以及及时延敏感数据的应用环境中, 应使用基于链路质量的分簇算法; 在巡查监测、通信中继等需要无人机集群进行长时间、远距离作业的应用环境中, 应使用基于能耗的分簇算法; 在需要执行协调控制类、协同工作类任务, 涉及任务规划、资源分配等问题时, 应使用面向任务的分簇算法。虽然分簇在各类自组织网络中得到了大量应用, 但无人机自组网的任务不确定性更高, 面临环境的动态性更强, 分簇的机制对簇首的要求比较高, 这容易造成单点失效问题, 灵活性与可靠性均不足, 因此, 在某些任务与环境极度不确定的场景中, 需要一种更加适合在动态环境中应对不确定任务的分层架构。

3 基于联盟的大规模无人机自组网分层架构

近年来, 作为大规模无人机自组网分层架构体系的一种较新的方法, 联盟在军事作战领域^[42-43]、多智能体领域^[44-45], 以及空中管制领域^[46-47]得到广泛应用。在大规模无人机自组网中, 无人机通常根据任务来结盟。由于单个无人机的载荷有限, 需要将满足目标任务资源需求的无人机分配给该目标任务。这种共同执行同一目标任务的无人机团队就被称作一个联盟^[48]。当任务完成后, 联盟解散, 待发现新目标后,

根据需求形成新的联盟来完成任务^[49]。图 2 给出了联盟重组的过程, 图 2(a)中存在两个任务 T1 和 T2, UAV2 发现 T1 后与 UAV1 组成联盟 1, UAV8 发现 T2 后与 UAV6 组成联盟 2, 在完成 T1 和 T2 后, 两个联盟解散并与其他无人机继续巡航; 图 2(b)中 UAV7 发现新目标 T3, 并与 UAV5 和 UAV4 组成联盟共同执行任务。

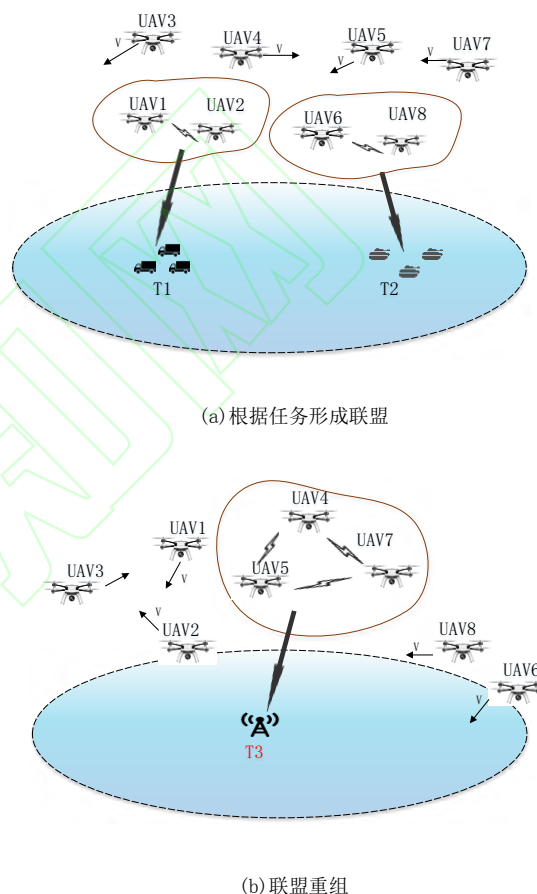


图 2 联盟重组过程

Fig.2 Alliance restructuring process

文献^[50-52]研究了多无人机在防空作战中协同执行搜索与打击任务时的联盟形成方法, 考虑到, 资源消耗与资源负载不均的因素提出以最小化目标打击时间和最小化联盟规模为优化目标, 以同时打击目标且满足打击资源需求为约束条件的两阶段联盟组建方法。在阶段 1 中, 进行联盟集合的

初始化,生成最短时间到达任务目标的联盟集合。阶段 2 是在阶段 1 所形成的联盟的基础上进一步优化,得到最小数目的联盟集合。这种分阶段的联盟组建方法降低了计算复杂度,最小规模的联盟集合使得在满足任务打击需求的同时,有更多无人机能继续搜索新的目标,在面对突发任务时能实时进行应对。然而,这些研究并没有考虑通信约束对联盟形成的影响。文献^[53-57]研究了未知环境下面向战术任务的异构无人机联盟组建,并将通信范围、通信时延等通信约束考虑在内。文献^[58]提出一种有效的机制来确定通信约束下的动态网络中潜在的联盟成员节点。该机制利用中继节点进行消息传输,并定义消息生存时间来决定数据包从源节点到目的节点最多可以传输的跳数,同时考虑了排队延时、传播延时以及中继节点的处理时间。上述文献所提出的算法可用于未知环境下的目标搜索与打击,并形成最小规模的联盟,以最短时间完成总任务,考虑了无人机资源差异,但是没有对无人机通信资源进行分配优化。为满足城市中感兴趣位置的服务要求,文献^[59]研究了一种无人机通过汇集其资源来形成联盟的方法。文献^[60]针对覆盖场景中的侦察与数据传输任务,研究了无人机位置部署和联盟选择问题,提出一种基于联盟组建的多无人机协同部署模型。仿真结果表明,该机制提高了多无人机的覆盖性能。然而,该联盟的组建仅考虑了无人机的覆盖效用和能量消耗的关系,没有考虑联盟间的复杂关系。因此可以看出,联盟的形成与运行过程不需要集中管控,灵活性较强,适合在动态的环境中应用群体智能来应对各项不确定的任务。

4 分簇与联盟的对比分析

大规模给自组织网络的资源分配、信道接入以及网络路由等带来挑战,分簇与联盟作为分层体系架构的两种形式可以在一定程度上应对这些挑战。表 1 对比分析了分簇与联盟的优缺点,根据分簇与联盟的特点总结了两类架构适合的应用场景。

表 1 分簇与联盟的优缺点分析

Table 1 Advantages and disadvantages of clustering and alliance		
	分簇	联盟
优点	1) 簇头可以基于更多的外部信息进行决策分配	1) 快速响应高速变化的任务环境,灵活地执行任务
	2) 只需要有簇头与基站进行通信连接,扩展了任务执行范围	2) 能够合理使用携带的有效资源,避免资源的浪费
	3) 缓解了大规模集群中路由冲突与网络通信开销问题	3) 可以通过最佳路由进行数据传输
缺点	1) 对通信带宽要求高	1) 任务分配时容易相互冲突
	2) 簇的稳定性受簇头影响大	2) 无人机之间的协商时间延长
	3) 数据的传输不一定经过最佳路由	3) 数据在网络中的路由开销较大
	4) 面对复杂任务时,因受簇头控制而不够灵活	
应用 场景	适合应用于任务与环境比较固定的场景	适合用于任务与环境不确定的场景

通过表 1 的分析可以知道,在大规模自组网中,分簇与联盟两种分层架构各有千秋,在任务与环境比较固定时,分簇效率高,反之,需要联盟的架构来应对不确定性,根据无人机应用场景合理选择分层架构,可以应对大规模给无人机自组网带来的挑战。

5 下一步的研究方向

大规模无人机自主集群是无人机的一个重要发展方向，通过无人机自组网，可以有效解决大规模无人机之间的自主协调问题，实现信息高速共享并降低故障发生率。为应对大规模所带来的挑战，分层体系架构引起了学术界以及工业界的广泛关注。分簇算法在传统移动自组网以及车联网、无线传感网中的研究较为成熟，但成果无法被直接应用于大规模无人机自组网，与此同时，更加适合不确定性任务与环境的联盟架构在大规模无人机自组网的研究还处于起步阶段。因此，大规模无人机自组网的分层体系架构需要进一步的研究，本文总结如下：

（1）低时延业务应用的分层架构

紧急救灾场景以及日益复杂化的监控环境，要求无人机传输及时传输音频、视频等多媒体信息以及时延敏感数据，这些业务对带宽、时延和吞吐量等方面都有较高的要求。然而，无人机带宽有限，大规模给网络路由带来了挑战。因此，需要在大规模无人机自组网中构建支持低时延业务应用的分层架构来减少网络冲突与时延，以保证多媒体业务和时延敏感业务 QOS 要求得到满足。可以在选择簇头时，考虑簇头之间以及簇头与簇成员之间的通信质量，优先保证符合时延的节点组簇。完成分簇后，通过最短路径选择合适的簇头构建虚拟骨干网络，以优化网络中的通信开销和传播时延，尽可能保证数据及时且正确传输。鉴于容错机制能在一定程度上保障通信连接与质量，在架构设计时可考虑容错性考虑在内，比如，可以合理优化簇头的数目和位置，保证数据传输包传输的正确率，也可以通过设置簇头候选节点来应对因簇头节点故障导致的通信问题。

（2）分簇与联盟共存的分层架构

分簇与联盟作为自组网分层架构的两种形式，在大规模

无人机集群中各有其利弊，分簇可以实现快速配置与动态网络重构，而联盟则不受簇头控制，能灵活地执行任务。当前的研究都是将两种思想独立分开，没有考虑分簇与联盟共存的系统。为了充分利用两种分层架构的优点，可以研究分簇与联盟动态切换的共存分层架构，比如，在任务搜索阶段以分簇的形式进行集群，减少网络中路由开销和通信开销，执行动态任务时，簇中合适的节点暂时分离出来结为联盟，以灵活应对复杂任务。

（3）有人/无人机协同的分层架构

无人机成本低、机动能力强，可代替有人机在恶劣条件下执行危险任务，在瞬息万变的战场环境中，快速决断并进行打击是作战的关键。然而，现有无人机的智能系统还不足以完全替代人的思维与决策，可能会贻误战机。将有人/无人机协同系统用于军事作战任务中，有人机将辅助无人机协同作战，根据任务将有人/无人机集群分解成多个由有人机和无人机组成的联盟，有人机指挥无人机集群执行对应的任务簇，无人机将任务完成情况报告给有人机进行效果判断。因此，有人/无人机混合集群能够实现能力互补并提高协同能力，适合现有技术下的无人机智能集群。

（4）基于生物群体智能的分层架构

生物个体在感知、运动等方面能力有限，但通过个体间自主决策以及信息交互构成大规模群体，并涌现出自组织性、协作性、稳定性以及良好的适应性，这与无人机集群分布式局部交互、整体自组织性的特点相吻合。无人机集群可从雁群、鸽群、狼群等生物群体智能获得启发，借鉴生物群体的智能控制行为，实现无人机集群自主化、智能化。鸽群^[61]在飞行过程中组建的网络具有层级性，其中高等级个体具有一定的引领作用，而低等级个体的行为会受到高等级个体的影响，这一特征可应用于无人机集群的分层架构中，无人机集群个体间通过与周围邻居的交互稳定飞行，在出现突发情

况时, 也能迅速与高等级个体保持一致。

结束语 鉴于大规模无人机自组网是当今无人机系统通信领域的关键技术与研究热点, 本文研究了无人机自组网分层体系架构, 具体对分簇和联盟的相关研究工作进行了总结分析, 并讨论了无人机分层体系架构所面临的开放性问题。

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] SEMSCH E, JAKOB M, DUSAN PAVLÍČEK, et al. Autonomous UAV Surveillance in Complex Urban Environments[C] // Proceedings of the 2009 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT 2009, Milan, Italy, 15-18 September 2009. ACM, 2009.
- [3] KINGSTON D B, BEARD R W, HOLT R S. Decentralized Perimeter Surveillance Using a Team of UAVs [J].IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(6):1394-1404.
- [4] LI K, VOICU R C, KANHERE S S, et al. Energy Efficient Legitimate Wireless Surveillance of UAV Communications [J].IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, PP(99):1-1.
- [5] P. KATSIGIANNIS, L. MISOPOLINOS, V. LIAKOPOULOS, T. K. ALEXANDRIDIS, G. ZALIDIS. An autonomous multi-sensor UAV system for reduced-input precision agriculture applications[C] // 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Athens, 2016, pp. 60-64.
- [6] OTTO A, AGATZ N, CAMPBELL J, et al. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey [J].Networks, 2018, 72(4):411-458.
- [7] SCHERERB, RINNER, Persistent multi-UAV surveillance with energy and communication constraints[C] // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2016, pp. 1225-1230.
- [8] ERDELJ M, NATALIZIO E, CHOWDHURY K R, et al. Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management [J].IEEE Pervasive Computing, 2017, 16(1):24-32.
- [9] REINA D G, TORAL S L, TAWFIK H. UAVs Deployment in Disaster Scenarios Based on Global and Local Search Optimization Algorithms[C] // International Conference on Developments in Esystems Engineering. 2017.
- [10] A. KHAN, E. YANMAZ, B. RINNER, Information exchange and decision making in micro aerial vehicle networks for cooperative search [J].IEEE Transactions on Control of Network Systems, vol. 2, no. 4, pp. 335-347, Dec. 2015.
- [11] FIGUEIRA N M, FREIRE I L, TRINDADE O, et al. Mission-Oriented Sensor Arrays and UAVs - a Case Study on Environmental Monitoring [C]//ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015:305-312.
- [12] Q. WU, Y. ZENG, R. ZHANG. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 3, pp. 2109-2121, Mar. 2018.
- [13] CHEN J, XU Y, WU Q, et al. Interference-aware Online Distributed Channel Selection for Multicluster FANET: A Potential Game Approach [J].IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3792-3804.
- [14] <http://finance.sina.com.cn/chanjing/gsnews/2018-05-02/doc-ifzyqqiq0018947.shtml>.
- [15] REN G S, CHANG J, CHEN W S, Present and Prospect of Intelligent Autonomous Control for UAV [J].KONGZHI YU XINXI JISHU, 2018, 456(6):13-19.
- 任广山, 常晶, 陈为胜. 无人机系统智能自主控制技术发展现状与展望[J]. 控制与信息技术, 2018, 456(06):13-19.
- [16] BEKMEZCI, SAHINGOZ O K, TEMEL. Flying Ad-Hoc

Networks (FANETs): A survey [J].Ad Hoc Networks, 2013, 11(3):1254-1270.

[17] LI X, CHEN J. An Efficient Framework for Target Search with Cooperative UAVs in a FANET[C] // the 2017 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA), Guangzhou, China, 2017, pp. 306–313.

[18] CHEN Y, LIANG J H, ZOU S, et al. Research on topology control algorithm of UAV Ad Hoc network[J]. Computer Simulation, 2010, 27: 33-37.

陈瑶, 梁加红, 邹顺, 曹娟. 无人机 Ad Hoc 网络拓扑控制算法研究[J]. 计算机仿真, vol. 27, pp. 33-37, 2010.

[19] Q. WU, Y. ZENG, R. ZHANG. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2018, 17(3):2109-2121.

[20] S. HAYAT, E. YANMAZ, R. MUZAFFAR. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.

[21] M. Y. ARAFAT AND S. MOH. A Survey on Cluster-Based Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle Networks [J]. IEEE Access, 2019, 7:498-516.

[22] O. S. OUBBATI, M. ATIQUZZAMAN, P. LORENZ, M. H. TAREQUE, M. S. HOSSAIN. Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives [J]. IEEE Access, 2019, 7:81057-81105. .

[23] WEI D, CHAN H A. A Survey on Cluster Schemes in Ad Hoc Wireless Networks[C] // International Conference on Mobile Technology. 2009.

[24] MEHTA S, SHARMA P, KOTTECHA K. A survey on various cluster head election algorithms for MANET[C] // Nirma University International Conference on Engineering. 2012.

[25] DU J, YOU Q, ZHANG Q, et al. A weighted clustering algorithm based on node stability for Ad Hoc Networks[C] // International Conference on Optical Communications & Networks. IEEE, 2017.

[26] F. AFTAB, Z. ZHANG AND A. AHMAD, Self-Organization Based Clustering in MANETs Using Zone Based Group Mobility [J]. IEEE Access, vol. 5, pp. 27464-27476, 2017.

[27] ZANG C, ZANG S, Mobility prediction clustering algorithm for UAV networking[C] // GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2012.

[28] SHU J, GE Y, LIU L, Mobility prediction clustering routing in UAVs[C] // International Conference on Computer Science & Network Technology. IEEE, 2012.

[29] M. R. BRUST, M. I. AKBA, D. TURGUT, VBCA: A virtual forces clustering algorithm for autonomous aerial drone systems[C] // 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), pp. 1-6, 2016.

[30] XIAO CHENG, CHAO DONG, MOOC: A Mobility Control based Clustering Scheme for Area Coverage in FANETs[C] // International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE 2018.

[31] W. ZAFAR, B. M. KHAN, A reliable delay bounded and less complex communication protocol for multicluster FANETs [J]. Digit. Commun. Netw. , vol. 3, no. 1, pp. 30-38, 2017.

[32] YU, YUNLONG, LE RU, KUN FANG, Bio-Inspired Mobility Prediction Clustering Algorithm for Ad Hoc UAV Networks [J]. Engineering Letters, 2016, 24:328-337

[33] FARHAN A, ALI R, MUHAMMAD K, Energy Aware Cluster-Based Routing in Flying Ad-Hoc Networks [J]. Sensors, 2018, 18(5):1413.

[34] A. KHAN, F. AFTAB, Z. ZHANG, BICSF: Bio-Inspired Clustering Scheme for FANETs [J]. IEEE Access, 2019, 7:31446-31456.

[35] C. WU, T. CHIANG, L. FU. An ant colony optimization

algorithm for multi-objective clustering in mobile ad hoc networks[C] // 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Beijing, 2014:2963-2968.

[36] J. JOHN, PUSHPALAKSHMI R. A reliable optimized clustering in MANET using Ant Colony algorithm[C] // 2014 International Conference on Communication and Signal Processing, Melmaruvathur, 2014, pp. 051-055.

[37] FAHAD M , AADIL F , REHMAN Z U , et al. Grey wolf optimization based clustering algorithm for vehicular ad-hoc networks [J].Computers & Electrical Engineering, 2018:S0045790617321031.

[38] T. SHUYAN, Q. ZHENG AND X. JIANKUAN, Collaborative Task Assignment Scheme for Multi-UAV Based on Cluster Structure[C] // 2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Nanjing, Jiangsu, 2010, pp. 285-289.

[39] J. PARK, S. CHOI, H. R. HUSSEN, J. KIM, Analysis of dynamic cluster head selection for mission-oriented flying Ad hoc network[C] // 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Milan, 2017, pp. 21-23.

[40] M. R. BRUST, M. ZURAD, L. HENTGES, L. GOMES, G. DANOY, P. BOUVRY, Target Tracking Optimization of UAV Swarms Based on Dual-Pheromone Clustering[C] // 2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF), Exeter, 2017, pp. 1-8.

[41] M. R. BRUST, H. FREY, S. ROTHKUGEL, Dynamic multi-hop clustering for mobile hybrid wireless networks[C]//Proceedings of the 2nd international conference on Ubiquitous information management and communication, pp. 130-135, 2008.

[42] GEORGE J, SUJIT P B, SOUSA J B . Search Strategies for Multiple UAV Search and Destroy Missions [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 61(1-4):355-367.

[43] LIU C, GAO X G, FU X W, et al, Coalition Formation of Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles in

Cooperative Search and Attack in Unknown Environment[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(12):2284-2297.

刘重, 高晓光, 符小卫, et al. 未知环境下异构多无人机协同搜索打击中的联盟组建 [J]. 兵工学报, 2015, 36(12):2284-2297.

[44] MENG L , XU X , ZHAO Y. Cooperative coalition for formation flight scheduling based on incomplete information [J].Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(6):1747-1757.

[45] LIN L, SUN Q B, WANG S G, et al, Coalition Formation of Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles in Cooperative Search and Attack in Unknown Environment [J].Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(8):1983-1988.

林林, 孙其博, 王尚广, et al. 基于时间窗的多无人机联盟任务分配方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8):1983-1988.

[46] DIAO X H, FANG Y W, XIAO B S, et al. Multi-machine cooperative air combat task assignment based on multi-agent alliance [J].Journal of Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(9):1268-1275.

刁兴华, 方洋旺, 肖冰松, et al. 基于多智能体联盟的多机协同空战任务分配 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(9):1268-1275.

[47] TRAVIS C , JULIE A. Coalition formation for task allocation: theory and algorithms [J].Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2011, 22(2):225-248.

[48] ZHONG Y, YAO P Y, SUN Y, et al, Phased-forming method of manned/unmanned aerial vehicle task coalition [J].Systems Engineering and Electronics, 2017 ,39(9):2031-2038.

钟赞, 姚佩阳, 孙昱, et al. 有人/无人机任务联盟分阶段形成方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017(9).

[49] SUJIT P B , GEORGE J M , BEARD R W. Multiple UAV coalition formation[C] // American Control Conference, 2008. IEEE, 2008.

[50] L. ZHONG, G. XIAO-GUANG AND F. XIAO-WEI, Coalition Formation for Multiple Heterogeneous UAVs in Unknown Environment[C] // 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Qinhuangdao, 2015, pp. 1222-1227.

[51] TANG B, ZHU Z, SHIN H S, et al. Task-priority based task allocation of multiple UAVs with resource constraint[C] // Control & Automation. 2015.

[52] MANATHARA J G , SUJIT P B , BEARD R W. Multiple UAV Coalitions for a Search and Prosecute Mission [J].Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 62(1):125-158.

[53] Z. LIU, X. GAO AND X. FU, Coalition formation for multiple heterogeneous UAVs cooperative search and prosecute with communication constraints[C] // 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yinchuan, 2016, pp. 1727-1734.

[54] S. A. ALI, GAO XIAO GUANG, X. FU, Decentralized coalition formation of multiple UAVs in an uncertain region[C] // 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, 2016, pp. 916-920.

[55] ALI S A , XIAO GUANG G , FU X. Resource match cost based multi-UAV decentralized coalition formation in an unknown region[C] // 2017 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). IEEE, 2017.

[56] AFGHAH F , ZAERI-AMIRANI M , RAZI A , et al. A Coalition Formation Approach to Coordinated Task Allocation in Heterogeneous UAV Networks [J]. arXiv:1711.00214, 2017, 2017.

[57] ISMAIL, A.; BAGULA, B.A. TUYISHIMIRE, E. Internet-Of-Things in Motion: A UAV Coalition Model for Remote Sensing in Smart Cities [J].Sensors 2018, 18: 2184.

[58] W. SAAD, Z. HAN, T. BASAR, et al. A Selfish Approach to Coalition Formation among Unmanned Air Vehicles in Wireless Networks [C]//Proceedings of IEEE GameNets 2009,

Istanbul, Turkey, 2009.

[59] ISMAIL, A.; BAGULA, B.A.; TUYISHIMIRE, E. Internet-Of-Things in Motion: A UAV Coalition Model for Remote Sensing in Smart Cities [J].Sensors 2018, 18: 2184.

[60] LANG RUAN, JIN CHEN, QIUJU GUO, HAN JIANG, YULI ZHANG, DIANXIONG LIU, A Coalition Formation Game Approach for Efficient Cooperative Multi-UAV Deployment [J].Applied Sciences, 2018, 8(12): 2427.

[61] DUAN H B, LI P, Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors [J].Science & Technology Review, 2017(7):19-27.

段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制[J]. 科技导报, 2017(7):19-27.

游文静, 出生于 1996 年, 硕士研究生, 不是 CCF 会员, 主要研究方向为无人机组网。

董超, 出生于 1980 年, 博士, 教授, 硕士生导师, 是 CCF 会员, 主要研究方向为智能组网与通信。

吴启晖, 出生于 1970 年, 博士, 教授, 博士生导师, 不是 CCF 会员, 主要研究方向为认知无线电与智能频谱管控。



YOU Wenjing, born in 1996, postgraduate, Her main research interests include UAV Network and so on.



DONG Chao, born in 1980, Ph.D supervisor, is member of China Computer Federation (CCF). His main research interests include intelligent networking and communication of UAV, aviation 6G network, IoT and aerospace bionic science and technology.

中国知网