

前 言

随着相关学科和支撑技术的迅速发展,无人机在低空经济、智慧农业、抗灾救援等领域的应用越来越普遍。相较于单无人机,由多无人机构成的无人机集群具有更鲁棒的分布式体系架构、更高的效费比、更广的作用范围,因此无人机集群越来越受到人们的关注。为了使无人机集群形成一个协同工作的整体,首先需要重点解决无人机集群的组网问题。

无人机集群的组网技术非常具有挑战性。首先,对于无人机自身,其灵活移动会导致信道动态变化,其业务要同时兼顾数据和控制等信息的不同传输需求,其通信载荷面临功耗、尺寸和重量等方面的限制,这些都要求对其适用的通信机制和通信波形进行针对性设计;其次,从外部环境看,无人机的工作场景往往具有环境高复杂性、博弈强竞争性、信息不完整性等特点,而无人机集群的组网又难以集中控制,往往需要自组织地完成,这对无人机集群的组网技术提出了更高的要求;另外,无人机集群执行任务时的高自主性导致其通信组网中大部分操作都需要通过自主决策来完成。为了实现无人机集群可靠、灵活的自组网,还有很多基础理论和关键技术需要深入研究。

本书作者及其团队经过多年探索研究,在面向无人机集群的自组网方面积累了一些研究成果和实践经验,对其进行凝练和总结,从而形成本书,旨在尽量全面地向读者介绍面向无人机集群的无线通信、自组网、资源优化以及其中的智能化设计等相关技术。本书在写作过程中力求通俗易懂、面向前沿,可供相关领域的科研人员、工程师、研究生、高年级本科生和其他感兴趣的读者参考。

全书共8章,第1章是绪论,从总体上分析无人机集群通信和组网的相关背景知识与需要解决的问题;第2章主要介绍无人机集群中的无线传输技术,重点介绍支撑控制信息、协同信息和业务数据的一体化可靠通信波形设计;第3~5章主要介绍多无人机作为基站构建空中骨干网来服务地面终端场景下的关键技术,包括无人机空中基站的按需覆盖部署、终端接入控制,以及通信资源和移动轨迹等多维资源的联合优化等;第6~8章主要介绍无人机集群构成独立自组网中的关键技术,包括多信道快速建网机制、分布式资源分配机制和拓扑控制方法等。全书既包括无人机集群自组网中的关键技术和算法设计,也蕴含作者团队在实际应用中的一些工程实践,希望能给读者提供知识参考和启发。

感谢研究生周宣含、成纤、盛磊、张钦博、易晓、张力丹、罗展翔、王洁、李浩哲等在本书校稿中给予的帮助。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，诚请各位读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 无人机通信网络概述	1
1.2 无人机技术与发展	3
1.2.1 单体无人机发展概述	3
1.2.2 无人机集群发展概述	9
1.3 无人机通信组网的需求与发展趋势	12
1.3.1 需求分析	12
1.3.2 研究现状	15
1.3.3 发展趋势	21
1.4 本书章节安排	23
参考文献	24
第 2 章 面向无人机集群的一体化可靠通信	29
2.1 引言	29
2.2 基于 SC-FDE 的直接序列扩频通信波形	31
2.2.1 系统框架	31
2.2.2 时频混合直接序列扩频接收机结构	32
2.2.3 基于 CAZAC 序列的扩频通信方法	33
2.2.4 仿真结果与分析	34
2.3 控制数传一体化波形设计	36
2.3.1 基于循环码移键控的高速扩频通信方法	36
2.3.2 多模式自适应扩频通信机制设计	40
2.3.3 仿真结果与分析	41
2.4 认知跳频抗干扰机制	43
2.4.1 问题概述	43
2.4.2 分布式认知跳频通信框架	45
2.4.3 基于异步跳频机制的信道盲交汇策略	47
2.4.4 实验结果与分析	49
2.5 本章小结	56
参考文献	57

第3章 无人机空中基站按需部署及终端接入	59
3.1 引言	59
3.2 国内外研究现状及发展动态分析	60
3.3 无人机空中基站部署算法	63
3.3.1 系统模型与问题描述	64
3.3.2 无人机空中基站部署算法设计	68
3.3.3 仿真结果与分析	73
3.4 无人机辅助固定基站的部署算法	80
3.4.1 系统模型与问题描述	80
3.4.2 混合式部署算法设计及仿真	84
3.4.3 性能仿真与分析	89
3.5 地面终端用户接入算法	102
3.5.1 三种典型的接入算法	102
3.5.2 仿真结果与分析	105
3.6 本章小结	107
参考文献	108
第4章 无人机空中骨干网通信资源分配	112
4.1 引言	112
4.2 网络场景和协议介绍	114
4.2.1 并行传输 MAC 协议	115
4.2.2 无人机空中骨干网通信过程	116
4.3 系统模型和问题描述	116
4.3.1 位置预测和表征	117
4.3.2 定向天线三维模型	118
4.3.3 毫米波信道模型	120
4.3.4 问题构建	121
4.4 基于对偶的迭代搜索资源分配方案	123
4.4.1 构建对偶问题	123
4.4.2 计算对偶函数	124
4.4.3 优化对偶函数和求解原问题	127
4.4.4 基于对偶的迭代搜索算法	130
4.4.5 算法复杂度分析	130
4.5 序贯穷举资源分配方案	131
4.5.1 序贯穷举分配算法	131
4.5.2 算法复杂度分析	133

4.6 仿真结果与分析	133
4.6.1 算法收敛性评估	135
4.6.2 链路数量、时隙数量和波束宽度对平均吞吐量的影响	136
4.6.3 链路调度优先级	138
4.6.4 传输速率公平性	139
4.6.5 时隙分配公平性	140
4.6.6 计算复杂度	141
4.7 本章小结	142
参考文献	142
第5章 无人机空中基站轨迹和通信资源联合优化	146
5.1 引言	146
5.2 基于约束强化学习的单无人机轨迹与通信资源联合优化	148
5.2.1 系统模型与问题描述	148
5.2.2 基于约束强化学习的无人机轨迹与通信资源联合优化	151
5.2.3 仿真实验与性能分析	158
5.3 基于协作多智能体强化学习的多无人机轨迹与通信资源联合优化	163
5.3.1 系统模型与问题描述	163
5.3.2 基于协作多智能体强化学习的轨迹与通信资源联合优化	167
5.3.3 仿真结果与分析	175
5.4 本章小结	180
参考文献	181
第6章 无人机自组网抗干扰快速建网	184
6.1 引言	184
6.2 基于局部信息的多信道自主建网机制	185
6.2.1 问题定义	185
6.2.2 多信道自主建网算法	186
6.2.3 仿真结果与分析	193
6.3 基于自适应蜂鸟算法的拓扑优化	197
6.3.1 问题定义	197
6.3.2 基于 ADHA 的拓扑优化	201
6.3.3 仿真结果与分析	211
6.4 本章小结	219
参考文献	220
第7章 受生物启发的无人机自组网资源分配	223
7.1 引言	223

7.2 受萤火虫同步启发的时域避免碰撞演进机制	224
7.2.1 萤火虫同步现象及其数学模型	225
7.2.2 受萤火虫同步现象启发的免碰撞资源调度方案	231
7.2.3 仿真结果与分析	237
7.3 基于浓度扩散的频域多信道分布式自适应组网机制	239
7.3.1 问题建模	240
7.3.2 基于分布式分簇改进模型及算法	242
7.3.3 仿真结果与分析	245
7.4 基于图着色的时频空三维网络资源调度算法设计	251
7.4.1 基本概念与问题建模	251
7.4.2 基于图着色的二维资源分配	253
7.4.3 基于图着色的多频率下时频空三维资源分配	256
7.4.4 仿真结果与分析	258
7.5 本章小结	260
参考文献	261
第8章 基于虚拟力的无人机集群拓扑控制	263
8.1 引言	263
8.2 虚拟力场基本模型	266
8.2.1 引力模型	267
8.2.2 斥力模型	268
8.2.3 引力和斥力作用实例	269
8.3 基于虚拟力场的按需覆盖	274
8.3.1 系统模型与问题描述	274
8.3.2 虚拟力设置	275
8.3.3 基于虚拟力的分布式部署算法	279
8.3.4 算法仿真	282
8.4 基于虚拟力场的规则拓扑构建	287
8.4.1 系统模型和问题构建	287
8.4.2 虚拟力设置	288
8.4.3 基于虚拟力的拓扑构建算法	293
8.4.4 仿真结果与分析	294
8.5 基于虚拟力场的群体移动控制算法	299
8.5.1 系统模型和问题构建	299
8.5.2 虚拟力设置	300
8.5.3 基于虚拟力的群体移动控制算法	301

8.5.4 仿真结果与分析	307
8.6 本章小结	316
参考文献	316

第1章 绪 论

近十年来,随着人工智能、控制、通信和计算机等相关支撑技术的不断进步,以无人机、无人车和无人艇等为代表的无人系统得到迅速发展。无人系统也逐渐融入人们的生活中,在勘探测量、无人物流、智能交通、智慧农业等各行业领域都展现出广阔的发展前景。在各种无人系统中,无人机技术的发展尤为迅猛,无论是在民用领域还是国防领域都得到了广泛应用。在民用领域,面向普通民众的消费级无人机已随处可见,面向农业植保、森林防火、交通监视、电路巡检等应用的专业级产品也日趋普及;在国防领域,无人机更被视为未来战场的重要组成部分,不仅能作为实时、主动、全天候地探测和收集各类信息的重要手段,还能协助各类平台完成任务支援、信息对抗和火力攻击等高难度任务。无人机突破了有人系统设计的局限,可以预见,无论是在民用还是国防领域,无人机都将为未来生产形态、设备体系、科学技术的创新开启广辟空间。

在万物智联的趋势下,更多无人机将接入移动通信网络中,或者在一定区域内构建独立的专用通信网络。当前,无论是学术界还是工业界都已形成共识,无人机将在未来空天地一体化网络中充当重要的角色。本章将对无人机通信组网问题进行整体介绍,使读者有全面的了解。

1.1 无人机通信网络概述

无人机在网络中承担的角色大致可以分为空中基站(或者接入点、中继点)、终端和对等节点,如图 1-1 所示。图 1-1 用不同的无人机图标来表示不同类型的无人机。一方面,无人机可以作为地面用户的空中通信基站或者中继,特别是在临时热点区域或紧急情况下,不仅能扩大无线网络的覆盖面积,还能提升无线网络的传输性能,此时无人机扮演了基站、接入点或者中继点的角色。另一方面,无人机可以在移动网络架构下作为接入地面基站或者卫星的终端,即形成网联无人机,这样可以扩展操控者对无人机的控制区域,实现远距离操控,此时无人机是网络中的一个终端。另外,移动的无人机之间可以构建自组网络,不依赖基站、卫星或者地面控制站,在一个区域形成相互协作的无人机集群系统,此时各无人机都是相互对等的普通网络节点。可以预见,由于无人机的灵活性(包括部署的灵活性、移动的灵活性和角色切换的灵活性),无论是在空天地一体化的广域

覆盖网络中，还是在对热点区域的局部覆盖网络中，无人机都将扮演越来越重要的角色。

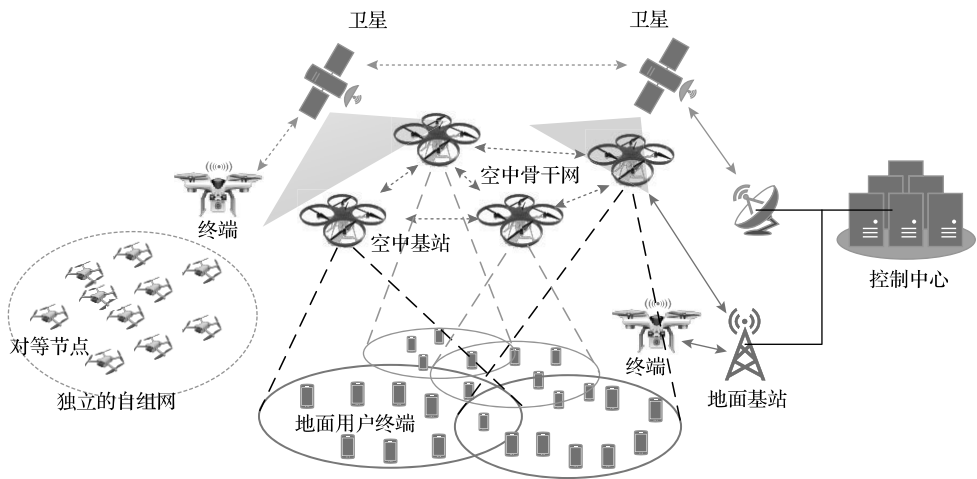


图 1-1 无人机通信网络示意图

无人机接入或者构建通信网络有其突出优势，因为无人机的空中飞行使其能够尽可能与地面用户建立视距传输链路，而且无人机移动的灵活性也能够实现快速部署和按需部署。同时，必须认识到无人机通信与传统地面装备的通信有很大区别，无人机自身设计和工作环境的动态性都为通信网络的设计带来挑战。表 1-1 列出了无人机与传统地面装备在通信方面的主要区别。从无人机自身看，与传统地面装备相比，其移动和悬停抖动会导致信道动态变化，并且通信波形设计需要满足功耗和实时性等方面的独特需求，其执行任务的无人化和强自主性导致其大部分数据传输和组网都需要通过自主决策来完成；从无人机的工作环境看，在很多突发事件中，无人机常常面临环境高复杂、博弈强对抗、信息不完整等挑战，无人机集群的行为无法像诸多无人机商业表演那样事先彩排，难以集中控制，遇到紧急情况时更是无法预先规划，只能自组织地完成。

表 1-1 无人机与传统地面装备在通信方面的主要区别

对比项	传统地面装备	无人机
操作者	由人使用、操作、调整	无人机自主使用和调整
决策/计算能力	本身自主决策能力有限	自主决策能力强
感知能力	主要为通信频谱	一般会配备更加丰富的声、光、电等传感器，具备多域感知能力
移动性	机动/移动性受限，主要在地面移动	移动灵活(不受地面障碍影响)，移动范围为三维空间

续表

对比项	传统地面装备	无人机
体积功耗	相对宽松	严格受限
适用场景	分型号系列，不同装备适用不同场景	深入前线/无人区，事先不了解通信环境，适应尽量宽阔的应用环境
对内容的了解程度	只是信息的传输，不了解内容	信息的产生源，了解信息产生的背景，知道信息的内容

随着相关学科理论、技术和制造工艺的不断发展，无人机的形态越来越多样化，个体的传感、计算等能力和飞控性能等不断增强，但受限于工作环境和可用的通信频段，承担无人机个体间联系纽带作用的通信和组网成为无人机集群形成生产力的瓶颈问题。一个重要原因就是其通信模块设计还是基于地面装备的思路，缺乏对无人机所处的通信环境的深入理解，因此难以针对性地对其适用的射频天线、通信波形和组网机制进行设计。

综上所述，目前无人机通信网络中还有许多基础性的理论问题和关键技术问题需要解决。这也是本书写作的主要动机，希望作者的一些前期研究和探索能给读者带来启发。为此，首先简述无人机技术与集群技术的发展现状，然后分析无人机个体间以及无人机与地面设备间的通信组网需求和特点，并基于此对无人机通信组网要解决的问题和现状进行概述，最后给出本书章节安排。

1.2 无人机技术与发展

1.2.1 单体无人机发展概述

1. 商业/民用无人机领域的发展概述

随着技术的不断进步和应用场景的拓展，无人机将发挥更重要的作用，其在商业领域和民用领域的需求规模不断增长，特别是在货运快递、高效检查、精确测绘等垂直行业领域得到最快速的发展。在货运快递领域，无人机的快速配送将提升效率和降低成本，满足人们对即时送货的需求。国内外的快递业巨头以及全球数百家小型无人机公司正在通过建立无人机交付业务来彻底改变物流链和供应链的运营。这种递送方式将对医疗保健、紧急服务和物流等部门产生极大影响。在高效检查领域，面向建筑、消防、线路巡检等，无人机的应用可显著提高安全监测的效率和救援工作的及时性。特别是对石油和天然气开采、电力线和输电塔等重要基础设施进行检查、监测和维护，无人机有其独特的优势。在精确测绘领域，建筑、采矿和农业等行业从无人机捕获地理空间数

据的精确性和效率中获得更高的效益。无人机可帮助农民实现智能化管理,提高农作物的产量和质量。截至 2023 年,全球无人机测绘和测量市场约为 100 亿美元。此外,随着无人机技术的进步,人工智能和自动化控制的应用将进一步提升无人机的性能和功能,从而将进一步扩展无人机的应用场景。根据 2023 年 8 月发布的全球 181 个国家数据的年度商用无人机市场报告,包括商业和娱乐在内的民用无人机市场将增长到 546 亿美元,复合年增长率为 7.1%,其中商业无人机市场预计将增长 7.7%^[1]。

亚洲仍是商用无人机的最大市场。目前,我国已经具备自主设计研发低、中、高端无人机的能力,基本形成配套齐全的研发、制造、销售和服务体系,在无人机机种上已经形成种类齐全、功能多样的较完备的系列,而且性能指标也不断得到改善提升,部分技术已经达到国际先进水平,走上全面发展的道路。据统计,目前我国民用无人机的市场规模占比超过了军用无人机,达到 70%左右^[2]。未来,行业市场结构仍将不断改变,民用无人机市场将不断扩大。

整体而言,无人机在商业领域或者民用领域的各个行业中都有很大的发挥空间,而且随着市场的不断扩大,商业无人机的服务厂商进一步细分为三个领域:硬件、软件和服务。硬件厂商主要包括无人机平台制造商,以及无人机组件、系统和载荷的制造商等;软件提供商包括提供无人机飞行规划、数据分析和无人机管理的公司;服务供应商包括所有类型的无人机公司,这些公司提供服务租赁,如检查、测绘、农业植保等在较短时间内就可以完成的服务。在未来,人工智能、自动控制、信息通信、芯片制造、精密加工等相关支撑学科的不断发展将给无人机的行业发展带来不断的突破和新生力量,是推动无人机行业向上发展的原动力。

2. 军用无人机领域的发展概述

除了民用市场的无人机,军用无人机也得到了广泛关注。早在 20 世纪 70 年代,军用无人机就在战场上崭露头角。近年来,军用无人机越来越频繁地出现在局部战争中,无人机的发展也被越来越多的国家置于重要的地位。

一般而言,无人机按大小和质量可以分为大型无人机(500kg 以上)、中型无人机(200~500kg)、小型无人机(小于 200kg)、微型无人机(翼展 50cm 以下)。目前,所有军事强国都装备了大、中、小型等多种型号的无人机,用来执行侦察、监视、攻击、拦截等各种任务。国际无人机包括美国的“全球鹰”无人机、“死神”无人攻击机,以色列的“苍鹭”无人机,法国的“神经元”无人机,英国的“雷神”无人机,俄罗斯的“鳐鱼”无人机等。可以预见,在未来战争中,军用无人机的使用将会更加广泛。

与有人作战飞机相比,无人机在提升性能、降低成本、避免伤亡等方面都有突出的优点。首先,无人机不受飞行员生理和心理机能的限制,可以使性能得到大幅提升,在机动性、隐身性和飞行时长等方面优于有人机。飞行员能短暂承受的机动过载为 $7g \sim 9g$,无人机可到达 $20g$,最大飞行速度可达高超声速,续航时间可达数天。其次,无人机没有驾驶舱和救生系统,因此可以减小体积和重量,大大降低了研发和生产成本。携带相同的载荷时,无人机重量最大可减轻 57% ,体积最大可缩小 40% ,无人机的研发和生产费用为有人机的 $1/3$,操作维护成本为有人机的 $1/4$ 。而且无人机操作员的培养费用要大大低于有人机,目前世界各军事强国的无人机操作员数量已经超过战斗机飞行员数量。最后,无人机可以不受人身安全限制,执行危险单调任务,避免人员伤亡。在有核污染、生化武器或者其他安全威胁的地方,无人机具有应用优势,关键时刻还可以牺牲无人机来换取人员安全。

3. 无人机在通信网络中的角色分析

1) 无人机作为空中通信基站或者中继

尽管各种地面基站基本可以满足日常的通信负荷,然而当出现突发情况时或者在非常规的临时场景中,仅依靠地面无线通信设施无法满足现实需求,如重大自然灾害的网络重建、偏远地区的临时通信部署、重大节假日聚集活动现场的无线资源分配等。为了有效提升这些场景中无线通信的质量,可以通过部署无人机来辅助通信,在此场景下,宏基站(macro base station, MBS)用于提供地面区域的基本覆盖,无人机作为空中基站(aerial base station, ABS),当热点区域或者灾害区域存在多样或者大量的服务需求时,可以帮助地面宏基站提供高速率的数据覆盖。对于有无人机蜂窝基站和宏基站重叠覆盖的区域,可以使用无人机蜂窝基站来缓解下行流量拥塞,该区域用户可以基于用户优先级、信号强度信息或者与基站的距离信息来选择宏基站服务或者无人机机载基站部署的服务。对于宏基站无法覆盖到的区域,可以使用无人机作为中继,来满足地面用户的入网需求,此时可以基于地面用户的时间和空间分布特性来灵活部署无人机的位置。在我国最近几年的紧急救灾过程中,经常使用无人机作为空中通信基站为用户提供语音、短信和互联网服务,有效满足了当地救灾指挥通信需求,恢复了公众通信基本能力。

具体而言,无人机作为空中通信基站或者中继来辅助通信时具有如下优势。

(1) 视距信道。无人机可以悬停或盘旋在空中,因而与地面用户间的信道主要为直射链路。可以通过直射链路而不需要折射或散射,无人机与地面通信设备间的信道质量高、衰减小。因此,通过无人机辅助可以有效提升接收端的信噪比,进而实现高质量通信。

(2) 高移动性。无人机作为小型飞行器，可以通过遥控终端进行控制。由于空中并无遮挡且其自身的位置不固定，可以通过实时调整部署以实现应急通信。此外，对于一些非突发但临时的应用场景，无人机通信也可以方便快捷地进行部署。

(3) 低成本组网。无人机可以灵活部署，应用于复杂多变的场景及环境。由多无人机组成的蜂群可以在不同的应用场景下构建稳定的通信网络，并且可以进行多次再部署。因此，可以利用无人机进行低成本临时组网，以应对不同类型的需求。

2) 无人机作为移动网络终端

除了作为空中基站服务地面用户，无人机本身也可以作为新的空中用户，从空中接入蜂窝网络、卫星网络或者空天地一体化网络中进行通信，这种方式下的无人机作为移动网络终端的工作示意图如图 1-2 所示。蜂窝网络在全球范围内的可访问性，使得地面飞行员能够远程指挥和控制无人机，其操作范围广，为无人机在未来的应用开辟了新的领域。目前已公布的许多第五代移动通信技术 (5th generation mobile communication technology, 5G) 组网无人机项目，其基本原理是利用 5G 通信网络替代无人机上自带的通信链路。搭载 5G 通信模块的无人机和地面端计算机通过 5G 蜂窝网络，利用 5G 基站接入运营商服务器，最终实现无人机远程控制。

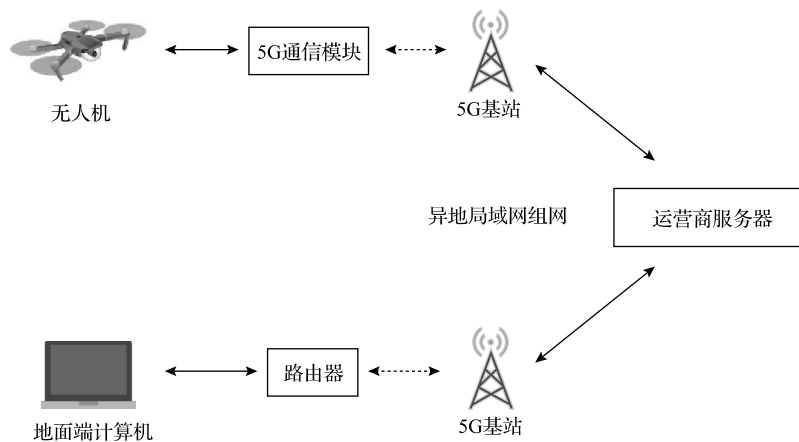


图 1-2 无人机作为移动网络终端的工作示意图

无人机作为空中用户，与地面基站相连接而形成的结构是多样的、灵活的。图 1-3 中给出了五种典型的无人机网络结构。

(1) 集中式结构 (infrastructure-based)：如图 1-3 (a) 所示，所有无人机都可以直接与地面控制站进行连接，它们之间的通信将由地面控制站进行中继。这种网络易于组织，通信协议较为简单；然而整个网络的性能将极大地受限于地面控制站的通信能力，存在通信瓶颈问题。

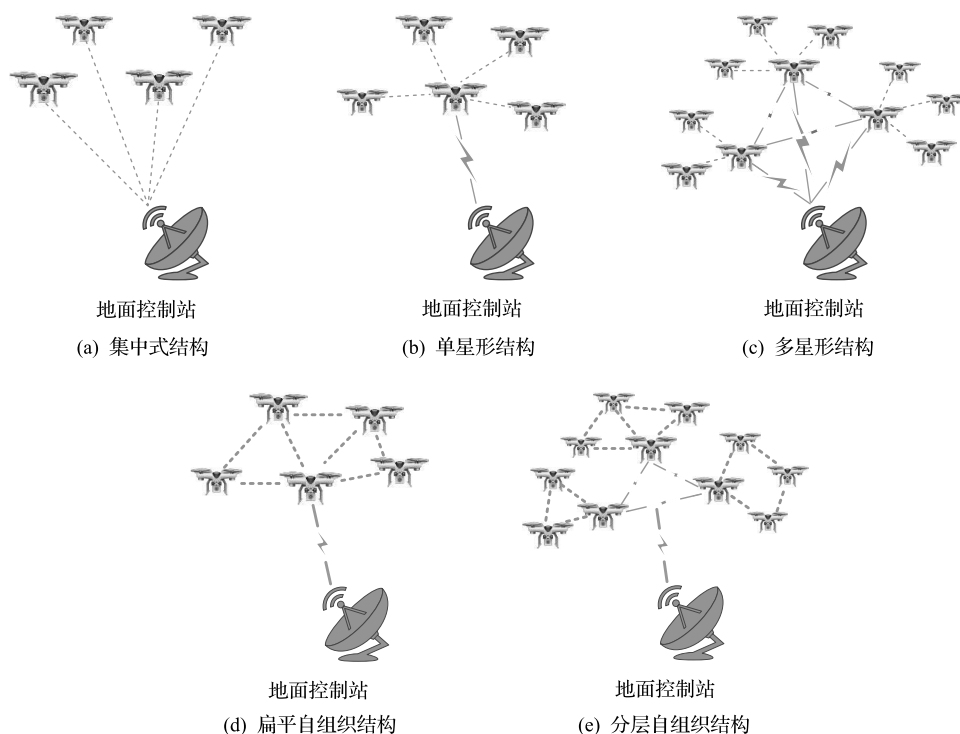


图 1-3 五种典型的无人机网络结构

(2) 星形结构(star)：存在一个无人机作为中心节点，所有无人机的通信都经过该中心节点进行中继。相应地，该无人机可能会成为系统的瓶颈，导致链路堵塞和高延时。此外，在大规模无人机场景下，还可能存在多星形拓扑，无人机形成多个集群，每个集群都是一个星形结构。图 1-3 (b) 和图 1-3 (c) 分别显示了单星形结构和多星形结构。

(3) 自组织结构(ad hoc)：无人机可以在没有中心节点的情况下通过单跳链路或多跳链路相互通信，单节点故障对整个系统影响不大。这种结构将减少下行链路的带宽需求。由于无人机之间的链路更短，通信延迟可以得到改善。只有一架或几架无人机需要与地面控制站连接，从而大大扩展了网络的覆盖范围。类似地，无人机也可以组织为多个集群，并且将它们中的每一个配置为自组织网络，称为分层自组织结构。图 1-3 (d) 和图 1-3 (e) 分别给出了扁平自组织结构和分层自组织结构。

上述三种组织结构都有各自的特点。根据无人机的任务、数量和特性，它们可以应用于不同的场景。实际上，这三种组织结构也可以相互转换。整体而言，无人机作为终端接入网络时，比较重要的就是接入时延的控制问题，因为无人机在空中飞行时，对控制的实时性要求很高。无人机在不同情况下的作用、连接方

式以及通信要求如表 1-2 所示。

表 1-2 无人机在不同情况下的作用、连接方式以及通信要求

无人机的作用	连接方式	质量安全要求(上限,延迟)	可选的通信技术
移动网络终端	地面基站到无人机	蜂窝(远程控制、低流量、实时)	5G/6G 用户无线电干扰/无线网络
	无人机到地面控制站	用于存储数据传输返回和大多数情况控制(高流量、实时)	取决于无人机生产商和地方法律,例如,在中国, 840.5~845MHz 用于上行链路控制; 1430~1444MHz 用于下行链路传感数据; 2408~2440MHz 作为备用链路
	地面基站到无人机 无人机到无人机	骨干网(高)	定向传输、毫米波、光(激光)
空中基站 (或中继)	无人机到地面用户	蜂窝网络(高)	5G/6G 用户无线电干扰/无线网络
	卫星到无人机	主要控制(低)	卫星无线电干扰
	无人机到地面控制站	用于监控和紧急控制(低流量、实时)	840.5~845MHz 用于上行链路控制; 1430~1444MHz 用于下行链路传感数据; 2408~2440MHz 作为备用链路

无人机终端在三维空间能够更灵活地移动,因此也出现了一个新的三维蜂窝网络研究方向,其模型如图 1-4 所示。不少学者开始将经典蜂窝网络中的研究拓展到三维蜂窝网络场景中,分析其网络容量、切换管理和移动性支持等。

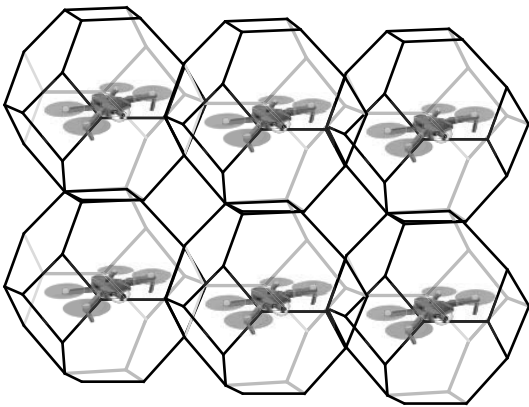


图 1-4 三维蜂窝网络模型

3) 无人机独立构建自组网

无论是作为空中基站服务地面终端用户,还是本身作为终端接入网络,无人机都是作为更大的蜂窝网络、移动互联网或者空天地一体化网络中的一部分。除了上述场景之外,多个无人机之间也可以不依赖任何基础设施,独立地构建一个空

中区域网,形成一种“空中自组网”或者“飞行自组网”(flying ad hoc network, FANET)。此时,无人机之间的信息传递都通过空中自组网相互传递,支撑集群协同控制、协同作业、拓扑控制等。大量无人机要完成自组网,需要自组网协议的支撑,这方面有很多传统移动自组网协议的研究成果值得借鉴,例如,目前最常用的媒体接入控制(media access control, MAC)协议仍然是以无竞争类的时分多路访问(time division multiple access, TDMA)和竞争类的带冲突避免的载波感应多路访问(carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA)为主,路由协议也主要是在自组织按需距离向量(ad hoc on-demand distance vector, AODV)路由协议、动态源路由(dynamic source routing, DSR)、BATMAN(better approach to mobile ad hoc networking)等传统自组网协议的思想上进行改进的。但是,整体而言这方面还有大量的工作要做。

除了网络协议之外,无人机的灵活移动性使其网络的部署相较于传统自组网技术有很大的区别。因此,无人机自组网的部署研究吸引了大量学者的关注,也做出了很多创新性工作,现有的工作可以分为最大化覆盖范围、拓扑控制以及目标追踪三类。其中,最大化覆盖范围主要解决的问题通常是给定无人机的数目,探究如何利用一定数目的无人机实现地面覆盖面积的最大化;拓扑控制方面要解决的问题主要与应用场景有关,例如,为了构建更加可靠的网络,在网络的部署中需要同时维持无人机之间的互联互通,而在一些特殊的应用中,引导移动自组网形成规则的拓扑也十分有意义;在目标追踪方面,主要考虑多个无人机在空中如何协同飞行追踪移动目标。当然,在一些场景中,无人机网络可能需要同时满足上述多种需求,例如,在构建空中骨干网时,既需要能实现最大化覆盖范围,也需要保持空中无人机之间的互联互通。

在无人机扮演的上述三种角色中,前两种相对比较好理解,它们实质上就类似于蜂窝网络中的基站和终端用户。下面重点介绍无人机集群独立构建集群通信网络的情况,这种情况多应用于军事应用场景。

1.2.2 无人机集群发展概述

现代战场环境日益复杂,对抗强度日益增大,单无人机受其性能制约,仍然存在一些局限性。当前军用无人机主要存在如下两方面问题。一是单架无人机机载功能有限,主要表现为单无人机机载设备的侦察能力有限,很难有效地全方位连续侦察和监视目标;单无人机的武器载荷有限,使得打击威力和效果受到限制;被赋予的任务日趋复杂多样,需要的传感器数量和种类不断增加。二是单无人机抗未知因素能力弱,主要表现为一旦发生设备故障,容易导致任务被延误,甚至被迫取消;在面临高威胁防空体系时,容易被拦截和毁伤,导致任务失败;地面控制链路较难对多无人机同时控制,导致空中无人机数量偏少。无人机的相关技

术研究和应用，在未来的一个重要趋势是由独立工作的单无人机向无人机集群协同工作发展。单无人机与无人机集群的对比如表 1-3 所示。

表 1-3 单无人机与无人机集群的对比

比较项	体系	效能	作用范围	智能
单无人机	取决于平台能力	取决于载荷	单体局部	取决于个体智能
无人机集群	更鲁棒的分布式体系架构	更高的效费比	更广的、可饱和的攻击	更高级的群体智能

在自然界中，为弥补生物个体能力有限这一缺陷，多数生物种群都能通过个体之间的相互交流和合作呈现出某种群体行为，如鱼群的结群游、鸟群聚集迁徙、蚂蚁协同搬运等。这些源自生物界的观察激励着研究人员深入探索集群系统群体行为的原理和模式，以期实现仅通过系统内局部的信息交换，使外部呈现出规则有序的协同行为的工作机制。受此激励，人们希望开发像鸟群、鱼群或者蚁群一样自由集结、可以执行全局任务的无人机集群系统，因此提出了由多架微小型无人机组成的无人机集群，如图 1-5 所示。

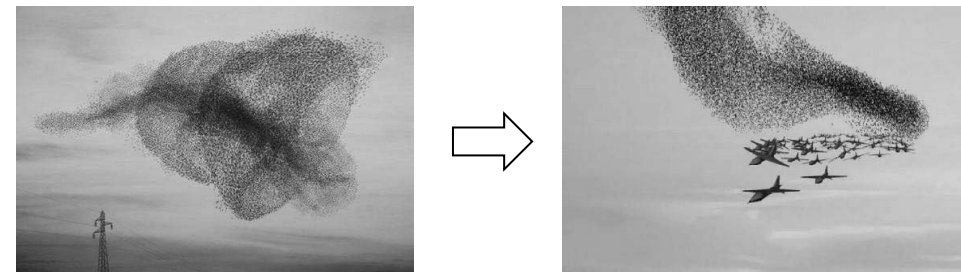


图 1-5 由鸟群到无人机集群

由多架微小型无人机组成的无人机集群在军事应用中具有很多优点，可以进一步提高性能、降低成本、提升可靠性。首先，无人机集群可以提升战斗力，多无人机协作可以缩短任务完成时间，通过增加无人机数量可以扩大覆盖范围；其次，无人机集群可以降低总成本，使用大量硬件简单的微小型无人机组成的无人机集群可以完成大型昂贵有人机的任务，但不需要考虑复杂的耦合情况，研发和生产成本较低，可以在飞机、舰船或汽车上发射起飞，也可以弹射或投掷起飞，保障成本低；最后，无人机集群可以提高可靠性和安全性，小型无人机被雷达发现的概率要低于单架大型飞机，在战争中，部分无人机可能会被击落或损毁，剩余的无人机仍然能完成任务，这一点在战争中很重要^[3]。正是由于无人机集群所产生的这种威力和影响，其发展已经受到各国的密切关注，特别是越来越引起国内外军事领域的高度重视。美国国防部已经在短短几年内连续发布 8 版无人机/无人系统路线图，快速推进了对无人机集群作战系统的研究，将大国间无人机集