

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.04.001

# 基于数据传输网络的无人机协同系统设计\*

袁 杰\*\*

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘要:**介绍了使用数据传输网络的方式实现的无人机协同系统。与传统的点对点测控系统相比,该系统在体系模型、成员类型和网络运行过程等方面有所不同。分析了该系统体系运行中的关键点,包括任务规划、网络管理、自组织以及移动环境中网络冲突。最后指出,为适应逐步增加的用户数量,后续发展将关注网络传输容量的增加和减少入网接入时间。

**关键词:**多无人机协同;数据链组网;网络管理;自组织网

**中图分类号:**TN919.2   **文献标志码:**A   **文章编号:**1001-893X(2013)04-0371-06

## UAV Cooperation System Design Based on Data Network

YUAN Jie

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** This paper introduces an Unmanned Aerial Vehicle(UAV) cooperation system based on data network. The system model, type of network member and operation process are different from those of traditional point-to-point TT&C system. Key points of the system are analyzed, including mission programming, network management, ad hoc and network collision. Finally, it is pointed out that in order to adapt to more users, the network transmission capacity should be increased and the access time should be reduced.

**Key words:** multi-UAV cooperation; data network; network management; ad hoc network

### 1 引言

随着无人机技术和装备的发展,越来越多的无人机开始在民用和军用领域使用,无人机的使用方式也必然会逐渐从单机应用转为多机编队协同应用。

近年来,无人机以及多种平台之间通过编队协同进行作业方式,已经受到普遍重视。如 2004 年,美国 STTR 项目演示了对多个无人机动态、抗毁无线网络分级控制能力,实现对周围环境的侦察监视;美国 2002 年开展的 SWARM 计划中,以微型、廉价无人机组组成编队,同时完成监视、侦察、情报汇集和攻击任务;美国防御科学与技术组织资助的 AVATAR 项目,计划使用具备自主能力的无人机编队为模型,研究多平台、多传感器组网能力;美国科罗拉多大学

开展了 AUGNet 项目,研究基于 ad hoc 网络的无人机组网技术在风暴探测、火灾侦察、极地研究等中的应用。我国无人机也处于快速发展期,目前在应用中还主要以单机任务为主,已经开展了部分有关协同的研究,主要的方向还是基于目前测控体系<sup>[1]</sup>的扩展,解决一站多机的问题<sup>[2]</sup>,对于多机之间的协同的研究工作还处于起始阶段。

以无人机组网与数据链技术为基础,可构建起具备资源快速配置、数据快速获取传输、指挥调度和管理功能的信息综合管理网络,促进无人机应用和保障技术的快速发展。

本文对多无人机协同的应用需求进行分析,提出一种通过通信组网的多无人机系统实现方案,通过合理的系统架构和流程设计可以适应多种无人机的协同应用需求。

\* 收稿日期:2013-02-07;修回日期:2013-04-12    Received date:2013-02-07; Revised date:2013-04-12

\*\* 通讯作者:18980768932@189.cn    Corresponding author:18980768932@189.cn

## 2 无人机协同系统设计需求

多无人机协同系统需要重点解决两个方面的问题:一是多无人机控制,包括一个或多个地面站对多架无人机的测控,以及任务过程中必要的控制交接;二是多无人机空空协同应用,通过协同体系设计,实现任务过程的多机协同工作。

多无人机协同系统的设计关键是实现协同工作过程中的信息交互能力,避免多机使用中带来的冲突和影响。

无人机的工作过程主要包括准备及起飞、出航和返航、任务执行、降落及回收等主要过程,如图 1 所示。



图 1 无人机任务过程示意图  
Fig. 1 Mission stage of UAV

无人机组网系统的特点在于飞行过程中控制对象为无人机群,相比于传统的单无人机系统,功能更为复杂、要求更高,主要表现在以下方面。

(1)起飞阶段:地面站起降需要依次控制多架无人机起飞和爬升。

(2)出航返航阶段:机载飞行控制系统控制无人机自主飞行,地面起降站与指挥控制站之间进行多无人机的控制权交接。

(3)任务阶段:无人机与无人机之间进行编队协同,保持队形或任务协调,完成多种协同任务。地面站指挥控制站需要对多无人机的协同过程监控和干预。

(4)降落及回收阶段:地面起降控制站依次接收对多架无人机的控制权,并控制无人机下降和着陆。

通过无人机通信组网系统可以实现多无人机的协同应用。无人机通信组网系统是将多个无人机,无人机地面控制站,以及对无人机信息的使用方均作为节点,组建覆盖所有节点的通信网络。利用通信网络的传输能力,实现多无人机协同中的信息传输,实现协同控制及任务应用。

## 3 基于通信网络的无人机协同系统

### 3.1 系统架构

基于网络通信方式的实际上是将多个无人机以

及相关的地面控制站通过通信网络连接起来。还可以根据需要将网络用户应用扩展至需要使用无人机的其他用户,如有人机、地面用户等,实现各用户之间所需要的通信连接,完成任务需要的各种信息传输。系统架构如图 2 所示。

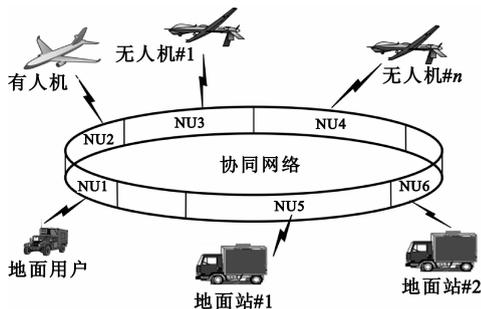


图 2 网络体系结构示意图  
Fig. 2 Network frame

其中地面控制站是无人机协同组网系统的网络管理中心,也是显示控制终端,负责无人机的飞行控制以及任务控制,也负责对其他无人机地面用户的请求进行响应。地面站通过协同组网系统网络传输能力接收来自无人机和其他地面用户的信息,对无人机遥感任务实施控制。无人机在地面站的控制下开展工作,同时可以响应其他地面用户的请求。

基于网络通信的无人机协同系统中,各参与成员通过采用统一的消息格式、组网协议和网络规划管理,完成互连互通,满足多平台协同应用需求,同时也实现地面站-无人机-无人机-其他用户之间的信息共享和融合<sup>[3]</sup>。

由于采用网络通信系统,因此系统中的网络参与平台需要与网络中的节点类型相对应,分为时间基准站、网络管理站和普通成员站三类。

#### (1)时间基准站

在网络内,所有成员需要完成时间同步,才能参与网络运行。在网络内存在无 GPS 时间同步能力的成员时,由网络基准站负责向所有网络成员分发系统时间信息,以维护网络时间同步。在网内成员均具备 GPS 时间接收能力的网络中,可以不设置时间基准站。

在该系统中,网络基准站主要由地面站担任,在特殊情况下也可以指定某无人机担任。

#### (2)网络管理站

网络的管理站负责管理网络内所有网络成员的管理。网络管理站实现网络资源分配、迟入网管理、网络状态监视。每个网络统一时刻只有一个网络管

理站。在该系统中网络管理站主要由地面站担任。

网络在丧失网络管理站的情况下,仍然能够正常运行,只是不具有迟入网管理和竞争时隙分配等功能。

### (3)普通成员站

网络中其他成员都为普通成员站,在网络运行过程中监听网络,按照网络协议进行信息收发和交换,并接受网络管理单元管理。利用网络的传输能力完成需要的各种协同动作。

## 3.2 网络运行过程

网络运行过程的主要流程如图 3 所示,主要阶段包括网络初始化、申请、认证<sup>[4]</sup>、入网、应用和网络关闭等。

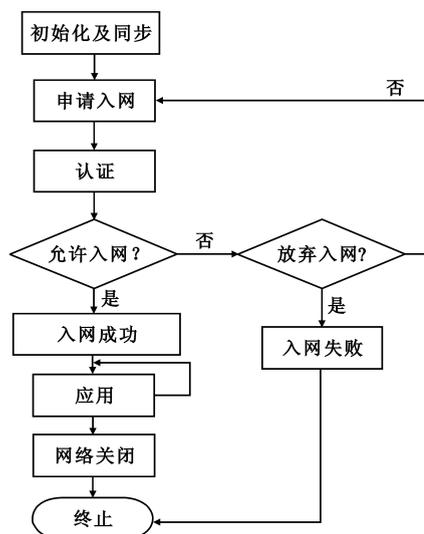


图 3 网络运行流程

Fig.3 Flow chart of network operation

### (1)网络初始化

网络初始化是为网络成员提供足够的初始化信息,使之能够在网络上交换信息,并运行处理的过程。

网络初始化过程通过初始化参数加载和/或操作人员手动设置参数信息来完成,主要的初始化参数包括传输参数、网络参数、本平台参数等。

各入网平台完成初始化后,根据设置好的网络参数启动网络运行。

### (2)入网

入网是指普通成员加入网络运行的过程,由网络管理站负责成员入网管理。入网过程如下:

1)成员在网络初始化后,接收时间消息,完成网络同步;

2)成员准备入网时,向网络管理站发送入网申

请消息;

3)网络管理站收到申请消息后,判断是否允许该成员入网,并进行应答;

4)成员根据应答结果进行处理:如果应答消息为不允许入网,再次尝试入网或放弃入网;如果应答消息为允许入网,则按照网络协议收发消息,入网成功。

### (3)网络应用

网络建立成功后,可以按照无人机的任务进行网络应用过程。无人机作为网络的重要节点,信息中继和路由是重要的应用方式,无人机可以为其他用户与地面站提供图像、语音、信息等多种业务的中继传输和网络路由。

进行中继应用的节点需要动态维护网络成员列表和路由关系,并根据路由关系或通过中继时隙进行信息的中继和路由。网管站可对网络状况进行管理控制,包括通过链路查看和修改网络路由信息,设定信息过滤规则等。

### (4)网络关闭

任务完成后,网络管理站执行网络关闭操作,发送网络管理消息给在网成员。在网成员接收到消息后,在指定的停止运行时间停止网络中的所有通信。

## 4 关键环节

### 4.1 起降规划及航路设计

合理的起降规划和航路设计是无人机应用的基础。

起飞降落规划需要根据参与任务的平台类型、活动位置、航线、机场保障能力等进行综合分析,制定平台起飞规划、地空通信保障规划、平台着陆导航保障规划和平台进近区域规划等。

起飞降落流程主要包括飞前规划、起飞、降落等部分。着重在起飞或降落前对无人机所需参数进行规划和计划,以保障平台能根据任务的需求安全地完成起飞和降落。起飞和降落规划包括场站数据载入、机场综合保障能力分析、跑道规划、通信参数规划、导航参数规划、离场进场顺序确定等过程。

航路设计是在综合考虑无人机的任务需求、平台特性和外界限制条件等诸多因素的情况下,设计出从起飞到任务过程再到回收的一条最优飞行航线<sup>[5]</sup>。

无人机航路设计需要根据协同控制规划制定的某平台的任务剖面,按照自身平台特性、地形以及威胁特性,规划出各平台实际的航线和飞行参数。

与单无人机运用相比,多无人机协同运用时,需

要综合考虑各无人机的任务分配、起飞回收顺序、相互的协同能力以及针对异常情况下的体系的重构等。

多无人机协同的航路设计从总体结构上包括协同控制设计、单平台航路设计和动态任务调整等几个方面。

协同控制设计需要根据任务情况确定无人机的数量和方式、各无人机的运行时段和任务交接,以及相应的飞行状态,其中重点是要具备系统动态调整能力。

动态任务调整是在任务过程中出现异常状态时,调整各无人机的任务要求,包括重新构建任务架构或者提前结束任务返航等。动态任务重新规划对于单机应用时也存在,多机协同使用时,动态调整与单机相比,重点是发现并制定措施解决多机相互影响。

### 4.2 网络管理

多无人机协同网络的管理需要解决链路管理、网络协议和控制交接等方面的问题。

#### (1) 链路管理

链路管理是网络管理的基础,将确定节点之间如何连接以建立满足当前操作任务需要的网络结构,包括确定每个节点的网络组成及链路参数;对连接到网络的各节点进行管理控制;提供链路资源,管理链路连接。

链路管理可以对网络节点提供资源管理服务,包括查找节点位置、链路带宽管理、链路管理控制、无线电频率管理和网络配置。

网络的链路管理对网络组成和链路参数进行设置调整以修改链路性能。网络可以确定每条链路上采用的数据传输率,并能对所给的链路进行数据速率调整。

#### (2) 网络协议

多无人机协同采用自适应组网方式<sup>[6]</sup>,网络在体系上采用分层设计和跨层协同相结合的方式。

在链路层,接入协议是自适应组网的关键,需要合理分配系统的无线信道资源。对于多无人机协同体系可以采用基于统计的分布式优先接入协议,这种接入协议类似码分多址接入,可有效控制传输时延,从而最大程度地保证低时延传输。

在网络层,路由协议是重点。采用基于位置信息的自组织路由方法,利用定位服务获取的位置信息可辅助路由维护过程,从而减少因为洪泛路由请求包而带来的控制开销。需要关注备份路由机制,备份路由可在缺省路由失效时,自动成为缺省路由,并在传输分组的同时再建立起一个备份路由,从而

使链路失效时间减少。

在应用层,网络要求能够实现随遇接入,即根据应用需求,保证机动平台通过选择接入点接入不同网络。接入选择机制主要采用分布式接入选择机制,当无人机节点位于多个空中接入点覆盖范围时,可以根据信号质量与接入点资源情况自行选择接入点。

#### (3) 控制交接

多无人机协同应用中,面临一站控制多机的问题,也会面临多站控一机的问题,因此无人机的控制交接对于系统的运行至关重要。

多无人机协同应用中需要实现高动态用户在高速运动过程中仍能够与网络中节点保持不间断通信,面临的问题主要包括位置管理和切换控制两方面。

位置管理通过无人机节点的注册认证、位置登记、更新和查找,实时有效跟踪高速飞行的无人机节点。切换控制则通过链路检测、切换准则、越区切换控制等策略,实现无人机由一个接入点的覆盖区域切换到另一个接入点的覆盖区域,切换管理操作过程如图4所示。

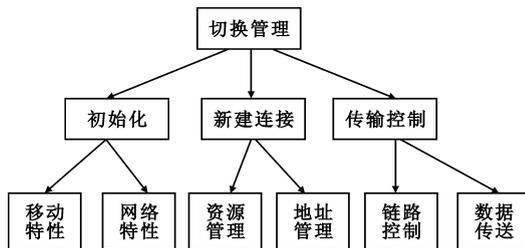


图4 切换管理操作  
Fig.4 Operation of switch management

在进行切换管理决策时,需要进行链路检测和切换判决,从而确定初始化、新连接建立和传输控制这3个过程的具体参数和执行时间。

### 4.3 自适应组网

#### (1) 网络架构

多无人机应用中,需要使用在不同节点(包括无人机、地面控制站以及业务用户)之间建立网络化通信体系。由于无人机和用户的移动性,因此需要采用自适应组网的方式。

自适应组网方式网络的建立、成员的入网、退网,网络的资源分配都基于自组织方式,分布式动态进行。各网络成员根据采用自组织,动态的方式使用网络资源。

网络成员规模和成员分布范围较小时,宜采用扁平式自组网(ad hoc)拓朴结构,即在已存在的机载

网络节点中建立所需的非持久网络联接。

基于网络通信的无人机协同系统,在使用中,会面临实际的限制,包括:目前的地面站多为一站控一机的方式,正在向一站多机方向发展;地面站分为起飞回收站和任务控制站,这两种不同的地面站在对无人机的控制中存在交替进行;网络中的成员之间由于所处位置不同,受到区域和地形的限制,可能在网络中不能直接通信,需要通过中继进行联通。

因此实际的网络可能变化成图 5 所示,其中无人机 1、3、有人机和地面用户是在一个相互可以直接通信的区域,无人机 2 所处的位置只能与无人机 1 直接通信,与无人机 3、有人机和地面用户都不能直接通信。地面站 1 和 2 分别可以和无人机 1 和 2 通信,与其他成员不能联通。

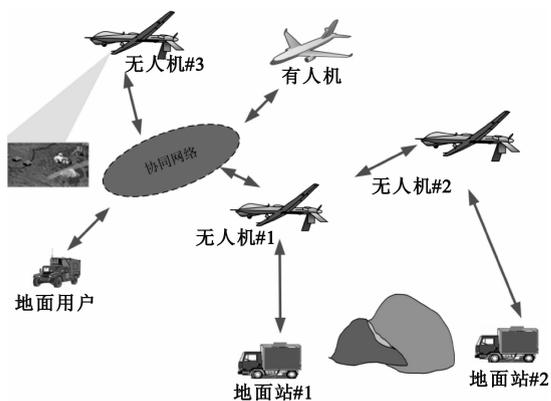


图 5 实际使用中的网络结构  
Fig. 5 Network frame in practice

网络成员规模和成员分布范围较大时,自适应网络也可以是以分层结构的方式动态组织的,以使用更高的层级来交换更多局域化子网之间的数据。这种网络拓朴结构将在飞机数量增加、飞机的机动模式较为稳定、或通信传输需求增加的时候最为有用。

这种网络可以是单种类型网络,也可以是多种类型网络混合使用。我们这里仅讨论使用单种类型网络的方式,网络内成员使用相同的频率、波形、加密体制、网络定时结构等网络运行参数,共享系统容量。网络通过网内中继、链间转发等手段,提供与外部节点或其他网络成员的交互能力,支持多层次网络结构。

(2)网络冲突

协同网络采用 TD 网络构型,对于单一网络而言,采用预分配网络时隙的规划方式即可解决大部分需求。但是对于多重网络而言,由于网络构型变

化比较复杂,有必要对多网络构型下的网络效能进行分析。

由于目前使用中,每个无人机都有固定的地面控制站和独立的测控链路,保证无人机的飞行安全。这样的测控链路基本是点对点或者点对多点的形态,基本都是固定的空地链路,因此在讨论,将空地测控链路简化掉,只讨论具有自组网能力的业务传输链路。

按照多网络协同的构型,可以将网络划分为骨干网和子网。如图 6 所示,骨干网为地面站以及中心区域活动的无人机组建的网络,子网为距离较远区域的协同网络,子网通过骨干网中的节点无人机场与骨干网连接。

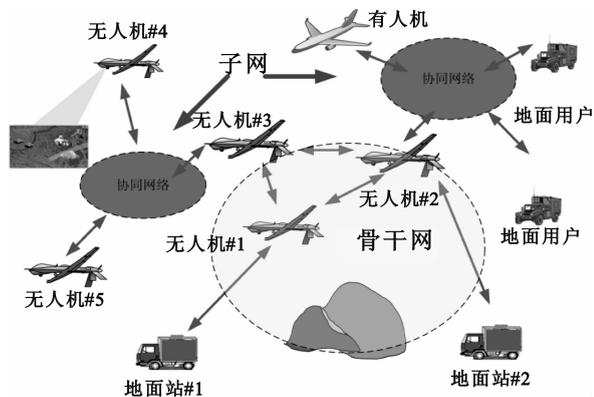


图 6 实际使用中多级网络结构  
Fig. 6 Frame of multilevel network in practice

其中骨干网中的网络节点均具备网关功能,及可以支持与其他网络的连接。子网中的网络节点可以不必具备网关功能。网络构型如图 7 所示。

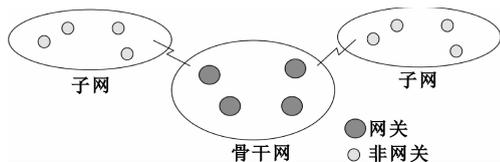


图 7 多级网络构型  
Fig. 7 Diagram of multilevel network

在正常的情况下,子网 1 和子网 2 处于较远的距离,彼此不能互通,但它们都可以通过某个骨干网的网关节点接入骨干网,从而实现联通。

但由于机载平台活动区域大,且运动速度快,因此网络结构将快速变化,骨干网与子网采用不同的传输方式,彼此可以避免冲突,但是子网采用相同的组网方式,随着网络成员的运动,网络会出现重叠,

其中的某个或某些成员可能处于不同子网的重叠区,从而出现冲突,如图8所示。

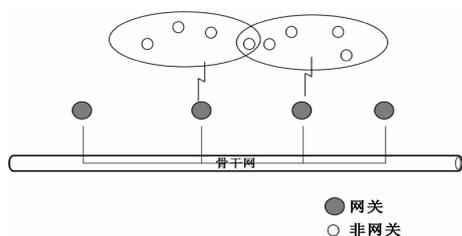


图8 网络重叠

Fig.8 Overlap of network

无人机组网使用自组网的方式,其网络协议可以使其中处于交叠区域的成员能够同时监听到不同的网络通信情况,从而判断已经处于重叠区,进而对网控站上报相应状态,由网控站选择相应的处理措施,包括:若交叠区节点所占时隙在两个网内没有冲突的情况下,可以不用改变网络参数,不影响使用;若交叠区节点所占时隙在两个网内存在冲突的情况下,则该节点重新预约时隙,避免冲突;可以将交叠区节点配置成路由节点使用,在两个网间中继信息。

## 5 结束语

本文针对多无人机的应用需求,提出了基于组网通信的协同应用方式,介绍了网络运行过程,并分析了起降规划、航路设计、链路管理、网络协议、控制交接等关键环节的设计方式;结合实际应用特点,针对移动网络的网络架构进行了分析,提出了重叠区域冲突问题的解决方法。

基于数据传输网络的无人机协同系统,可以实现多无人机及地面站之间的多点信息传输,系统组网方式灵活多样,适合于多无人机应用的场合。而系统应用中数据传输网络的总体传输容量以及传输和接入延迟对整体效能会产生影响,随着网络用户的增加,整体效能将会下降。通过多级网络的构建,可以在网络能力有限的情况下,支持一定数量用户增长。增加网络传输容量和减少接入时间,支持更加灵活的入网方式,将是后续工作研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 周定宇,黄大庆,周末. 无人机测控新体制研究[J]. 电讯技术, 2012,52(9):1427-1431.  
ZHOU Ding-yu, HUANG Da-qing, ZHOU Wei. Study on a New TT&C System for UAVs[J]. Telecommunication Engineering, 2012,52(9):1427-1431. (in Chinese)
- [2] 胡军,张建新. 多无人机测控系统研究[J]. 现代电子, 2000(2):9-13.  
HU Jun, ZHANG Jian-xin. Study on Measurement/Control System of Multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAV) [J]. Modern Electronics, 2000(2):9-13. (in Chinese)
- [3] 赖作镁,涂泽中. 数据链网络信息融合的有中心无中心处理结构[J]. 电讯技术, 2013,53(3):244-248.  
LAI Zuo-mei, TU Ze-zhong. Central Processing and Non-central Processing Architecture of Data Link Information Fusion[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(3):244-248. (in Chinese)
- [4] 张利银. 移动自组网证书服务技术研究及实现[J]. 计算机应用, 2002(12):22-24.  
ZHANG Li-yin. Research and Implementation of Certification Service in Mobile Ad Hoc Network[J]. Computer Applications, 2002(12):22-24. (in Chinese)
- [5] 曹建军,瞿雷,刁兴春,等. 基于蚁群算法的通信保障资源调度研究[J]. 现代军事通信, 2008(1):31-34.  
CAO Jian-jun, QU Lei, DIAO Xing-chun, et al. Research on Resource Scheduling of Communication Support Based on Ant Colony Optimization [J]. Modern Military Communication, 2008(9):49-52. (in Chinese)
- [6] 刘涛,黄本雄. 移动多跳自组网多播路由协议的比较与分析[J]. 计算机工程, 2002(8):165-168.  
LIU Tao, HUANG Ben-xiong. Comparison and Analysis of Multicast Routing Protocols for Mobile Multi-hop Ad Hoc Network[J]. Computer Engineering, 2002(8):165-168. (in Chinese)

## 作者简介:



袁杰(1974—),男,四川绵阳人,1996年毕业于电子科技大学电子工程系获学士学位,现为高级工程师,主要从事航空通信系统总体工作。

YUAN Jie was born in Mianyang, Sichuan Province, in 1974. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1996. He is now a senior engineer. His research concerns the integration of aviation communication system.

Email: 18980768932@189.cn