

高动态自组织无人机网络架构设计与模式研究

陈思静 张可 贺颖

(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 611731)

摘要 根据无人机网络特殊的应用环境和灵活动态的组网需求,提出了一种可切换组网模式的高动态自组织的无人机网络架构设计。该架构为无人机网络提供了全联通的对等模式和成簇的分簇模式两种组网方式,以满足不同任务的需求,并且可以实现两种模式的自主切换。此外,充分考虑网络工作时可能遇到的情况,提出了无人机网络管理的具体方案,即分别对两种模式下节点的出入网、越区切换进行管理,并且对组网模式的切换方式进行针对性的设计。分析论证表明,较以前的相关研究,这一新的体系架构和网络管理模式系统而完整,满足了无人机自组织网络节点移动快速、拓扑结构变换频繁的特殊应用环境,同时具有高可靠和可操作性。

关键词 无人机集群,移动 Ad hoc 网络,多模式组网,网络管理

中图分类号 TP393.11 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.011

Architecture Design and Mode Research of High-dynamic Self-organizing UAV Network

CHEN Si-jing ZHANG Ke HE Ying

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract A high dynamic self-organized and mode switchable network architecture of unmanned aerial vehicle (UAV) was proposed according to the special application environment and flexible networking requirements. The architecture offers full interconnected Peer-to-Peer mode and graded clustering mode for UAV network to meet the demands of different tasks, and both modes can be switched autonomously. Furthermore, a specific program for UAV network management was proposed considering what may be encountered when the network works. The program manages the nodes joining and leaving the net, handoff and other performances in two models separately, pointedly designs the way to switch networking mode as well. Analysis and demonstration show that this new architecture and network management are systematic and complete compared to previous studies. It can satisfy the fast changes in the nodes, frequent changes in topology, can meet the particular application environment of the UAV network, and has high dynamic condition and enforceability.

Keywords UAV cluster, Mobile Ad hoc networks, Multi-mode network, Network management

1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是由无线电遥控设备或自身程序控制装置操纵的不载人飞机^[1]。凭着其体积小、造价低、生存能力强的特点,以及高效、灵活的侦查、搜索等多种能力,在现代学术和军事方面发挥着显著的作用,如数据采集、人员搜救、气象监测、资源勘探等^[2-6],引起了广泛的关注。

随着技术的发展和任务需求的增加,单架无人机已很难满足复杂任务的需要,无人机技术的集群化网络化发展趋势不可挡^[7]。自组网(Ad hoc)最早由 Perkins 提出^[8],它是移动节点之间使用无线通信设备实现通信的网络。而移动自组织网不依赖于固定基础设施,节点间通过自组织、自我管理的方式动态组网^[9],具有很高的灵活性,是无人机集群最适合的组网方式^[10]。

相比于传统的 Ad hoc 网络,无人机组网覆盖范围广,节

点移动速度快,造成网络拓扑结构变化频繁^[11]。同时,无人机通常需要相互通信,合作执行任务,具有群移动性,这对实现网络的通信提出了更高的要求^[12-14]。对于无人机自组织网络,国内外已经开展了很多研究。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、火灾侦察等中的应用^[15];Majid 等人研究了使无人机作为中继节点来增强大规模无线移动自组网节点的连接性,确保网络中的任意两个节点可以通信^[16]。而我国在无人机领域的起步较晚,对于多机之间的协同的研究还处于起始阶段,如文献^[17]提出了一个基于分簇的无人机体系架构,解决了自主网络中集中管理、网络拥堵等问题;文献^[18]设计了一种无人机集群协同多任务分配模型,以对无人机群的协同任务分配方式进行优化。但是,这些研究基本都停留在单一组网模式的情况下,而无人机集群根据不同任务需要,通常需要变换多种通信模式工作,现有的网络架构无法满足无人机组网的需要。因此,设计合适的网络拓扑架构,并对网络进行

到稿日期:2014-03-10 返修日期:2014-05-08 本文受国家自然科学基金项目(61301155),航空科学基金项目(20110580002)资助。

陈思静(1990-),女,硕士生,主要研究方向为无人机网络,E-mail:echochen2012@126.com;张可(1979-),男,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究方向为传感器网络、无人机网络等;贺颖(1990-),女,硕士生,主要研究方向为多传感器数据融合。

可靠的管理对于无人机自组织网络的研究具有重要的意义。

本文对无人机自组织网络的整个体系架构和网络管理方式提出了一个系统的设计方案,考虑了两种不同的组网通信模式,并能自主地在两种模式中进行灵活的切换。第2节详细设计了无人机自组织网络的系统架构,包括组网通信模式、路由选路等方面;第3节给出了所设计网络的具体管理方法;最后总结全文。

2 无人机自组织网络架构设计

2.1 无人机自组织网络系统组成

无人机自组织网络系统从宏观角度来看,可以由控制中心、传感系统、卫星、通信系统和无人机集群组成,如图1所示。控制中心可以是机载或者地面的指挥中心,向无人机集群发布控制消息。传感系统也有地面和机载之分,主要是雷达系统,负责收集地面或无人机发回的状态信息。无人机集群通过移动 Ad hoc 互联形成网络接收控制中心的指令,执行相应任务,并将机载传感器信息、工作状态和运动状态信息传输到控制中心。此外,卫星系统提供机群和监测目标的精确位置数据,通信系统将控制中心、地面传感系统、卫星和机群联系起来,实现整个系统的协同。

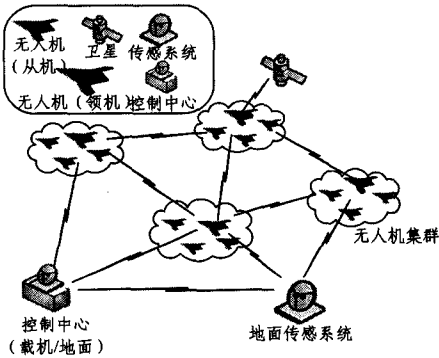


图1 无人机网络系统的应用示例

2.2 组网通信模式

考虑到无人机网络通信系统不需要基础设施的现实条件,采用星型与网状结合的 Mesh 网络架构作为无人机网络的主要组网方式。本文为无人机集群设计了两种通信组网模式:全联通的对等模式以及成簇的分级模式。

(1) 全联通的对等模式

全联通的对等模式基于网状拓扑,简单、易扩展,所有节点为对等结构,并且具有完全一致的功能,但维护路由的开销大,适合于小规模网络。因此,当需要的机群较少并且执行统一任务时选择全联通的对等模式,其网络拓扑结构如图2所示。

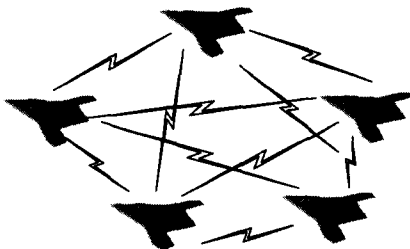


图2 全联通的对等模式拓扑结构

在这种模式下,各无人机通过与相邻对等节点的连接遍历整个网络,无人机之间直接进行通信,自主共享资源和信

息,大幅度提高了资源共享和信息交互。

(2) 成簇的分级模式

成簇的分级模式采用星型和网状结合的拓扑结构,应用了分布式算法,无需维护复杂的路由信息,可以对系统的变化做出快速反应,适合大规模网络。因此,当需要的机群较多并且要执行不同的任务时,如多个关键区域覆盖,则可以根据需要,提供成簇结构,其拓扑结构如图3和图4所示。

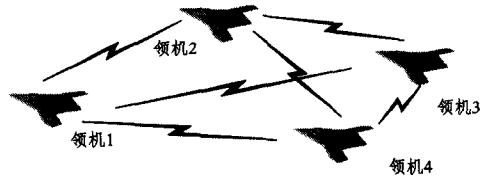


图3 领机之间对等通信形成网状拓扑结构

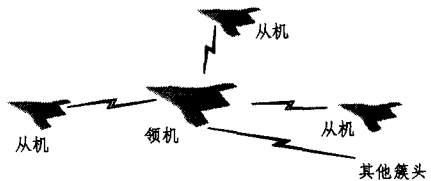


图4 领机和从机之间形成星型拓扑结构

通过成簇的方式,无人机集群被分成两级,即作为领机的簇头无人机和作为从机的簇内其他无人机。簇头和簇头之间进行对等通信,联成网状;簇内成员只能与该簇簇头直接通信,联成星型,从而降低了网络中的数据通信量,具有良好的实时性和可扩展性。

2.3 时间帧设计

合理的时间帧设计是保证系统性能的重要环节,为了满足无人机自组织网络复杂的数据传输要求以及分布式的时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)方式,本节对系统的时间帧结构进行了一个总体的设计。无人机自组织网络的通信组网模式是一个基于分簇的结构体系(全联通对等拓扑可以视为其中一种特殊情况),系统初次运行时运行成簇算法(Clustering)成簇,此后按轮(Round)在时间上周期运行,每个周期包括时间地点同步(SYNC&Positioning)、网络管理(Network Management)、分布式调度(Distributed Scheduling)和数据发送4个阶段,每一轮运行的时间帧结构如图5所示。

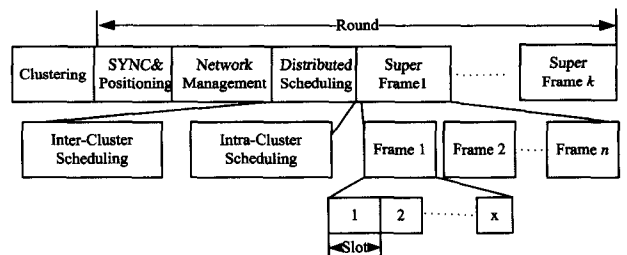


图5 时间帧结构设计

在完成成簇,获得时间信息同步后,进行网络管理,管理节点出入网和中心节点替换,接着进入分布式调度阶段,包括簇间调度(Inter-Cluster Scheduling)和簇内调度(Intra-Cluster Scheduling),将发送阶段的时隙分配给每一个节点。最后进入数据发送阶段,由 K 个相同的超级帧(Super Frame)组成,每个超级帧又包含 N 个时帧(Frame),调度算法分配簇占用一个或多个 Frame 发送数据。

2.4 MAC 调度方式

介质访问控制(Media Access Control, MAC)的设计是无线网络的关键技术之一。TDMA 是一种按时间片来划分每个成员发送时机的接入控制方式,它将时间轴划分成移动长度的、周而复始的时隙,消除了碰撞,降低了节点的能耗。本文采用一种分布式的 TDMA 协议作为无人机的 MAC 调度方式。

对于无人机的不同的模式,相应的调度方式也会有所不同。由于全联通的对等模式结构简单,所有节点均为对等结构,包含相同的 MAC,因此只需要用传统的 TDMA 方式对每个节点分配相应的时隙即可。而对于成簇的分级模式,MAC 调度分为簇间调度和簇内调度两个部分,如图 6 所示。

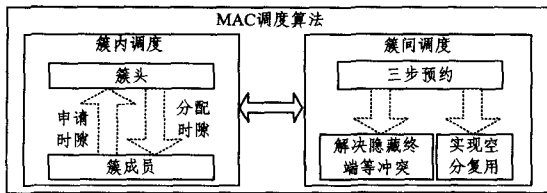


图 6 MAC 调度算法示意图

簇间调度由簇头之间分布式调度完成,其目的是为每个簇分配一个或多个 Frame。簇间调度阶段被分为 N 个预约帧(Reservation Frame),与数据发送阶段超帧 Super Frame 中的 Frame 一一对应,每个预约过程都通过 3 次信息交互完成:(1)预约资源,未申请时隙的簇头预约与所处预约帧 Reservation Frame 相对应的数据帧 Frame;(2)冲突检测,节点发送了预约请求以后侦听信道是否发生预约冲突;(3)节点确认,若信道无冲突,则预约成功,广播消息通知其他节点。

簇内调度由各簇头分别进行,同样分 3 个步骤:(1)簇头在自己簇内调度的时间段组播簇内调度消息,通知成员节点调度开始;(2)成员节点按照成簇顺序将自己申请的时隙数报告给簇头节点;(3)簇头统计簇内时隙需求,为各簇内成员分配 TDMA 帧内的时隙(Slot)。

通过这样的分布式调度方式和预约机制,为系统中每一个节点都分配了时隙,满足了两跳内的簇占用不同的帧,有效地避免了信道接入的冲突,解决了簇头之间的隐藏终端等冲突问题。

2.5 路由选路方式

对于高速移动的无人机自组织网络,延时十分敏感,路由极易断链,路由协议应当减小开销,并迅速重建路由。

对于全联通的对等模式,所有节点的结构相同,都有参与路由选择和数据传输的功能,因此可根据需要选择单播或者多播的方式。每一个节点都需要周期性地对目标节点进行探测,更新其邻居表,实现数据交付的过程,如图 7 所示。

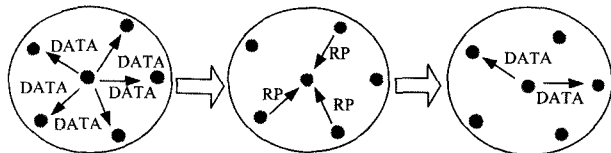


图 7 全联通的对等模式路由选路示意图

(1)当源节点有数据需要发送时,向其一跳邻居节点广播数据包 DATA;(2)当节点收到数据包后,检查自己是否是目标节点,若是则接收数据包中的信息,并回复收到数据包的消息 RP;(3)源节点通过收到的回复消息 RP 检查数据包是否成功接收,若否,则重新发送。

对于成簇的分级模式,簇内成员只能与该簇簇头直接通信,簇头融合了成员节点的数据之后与控制中心或其他簇头进行对等通信。簇头之间同对等结构一样采用单播或者多播的方式,而簇头与成员节点之间采用组播方式进行通信,过程同上。

此外,由于节点快速移动,目标节点很容易联系不上。为了减少数据丢失、提高数据交付率,考虑引入延迟容忍网络(Delay Tolerate Network, DTN),将暂时不能交付和发送的 DATA 消息存入 DT 队列中。当邻居节点更新时,若更新项匹配 DT 队列中的某项,则将该项发送至匹配邻居节点。

3 网络管理

3.1 节点入网

当有新的无人机要加入系统时,称为迟入网节点,需要将其加入网络。

对于全联通的对等模式,在网的节点会定期更新自己的邻居节点列表。当有迟入网节点想要加入网络时,在 Network Management 阶段向在自己一跳通信范围内的节点发送加入网络的请求信号 JOIN。节点收到 JOIN 消息后,向迟入网节点回发确认消息 ACK,更新自己的邻居节点列表;迟入网节点将收到回复 ACK 的节点加入到自己的邻居节点列表中,整个网络就能感知到新节点的加入,则迟入网节点入网完成,其入网过程如图 8 所示。

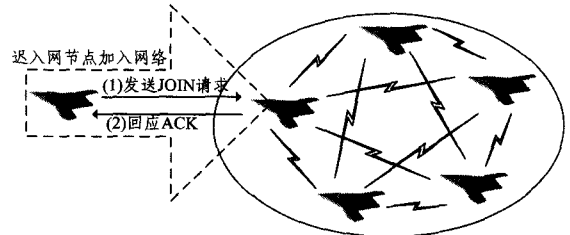


图 8 全联通模式迟入网节点入网示意图

对于成簇的分级模式,簇头节点每轮都会广播初始化消息 Initialization。当有迟入网的节点想要加入网络时,在 Network Management 阶段向网络发送加入网络的 JOIN 请求信号。簇头节点收到消息后,如果判断迟入网节点符合加入条件,则向迟入网节点发送 ACK 消息,并为其分配簇内编号 CID,则迟入网节点入网完成,其入网过程如图 9 所示。

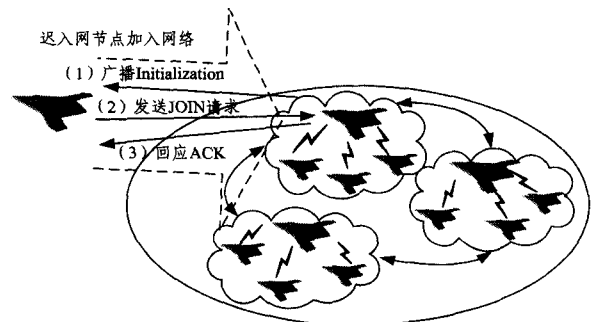


图 9 成簇模式迟入网节点入网示意图

3.2 节点脱离

由于故障、失效等原因导致普通节点的脱离,需要将节点从网络中删除。

对于全联通的对等模式,每一次进行邻居节点探测更新邻居表时,无效的节点不能再收发消息,则自动脱离网络。对于成簇的分级模式,簇头节点在簇内调度阶段若未收到申请

时隙的消息,则会向未申请时隙的成员节点发送 IFLIVE 消息,如果节点还在该簇,则向簇头发送 LIVE 消息。如果簇头未接到该节点的 LIVE 消息,则表明该簇成员离开了网络,簇头在接下来的簇内调度中不再为其分配时隙,节点脱离网络的过程如图 10 所示。

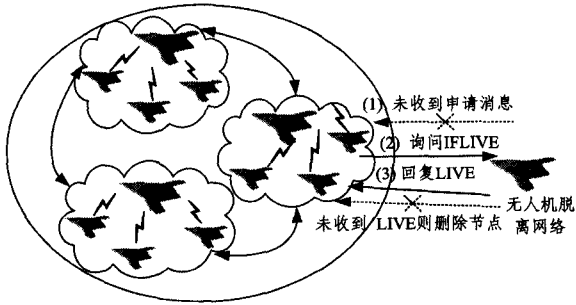


图 10 成簇模式节点脱离网络示意图

3.3 中心节点替换

对于成簇的分级模式,当中心节点被毁伤或别的原因失效,则需要中心替换。

如果簇内节点无法联系到簇头节点进行时隙分配,表示中心节点失效,成员节点不断侦听网络。簇内编号 CID 最小的节点具有升级成簇头的最高优先级,在进行系列初始化设置后转化为簇头,并在下一轮的 Network Management 阶段发布初始化消息 Initialization。其他簇内成员重新发出 JOIN 请求入网,中心节点替换的过程如图 11 所示。

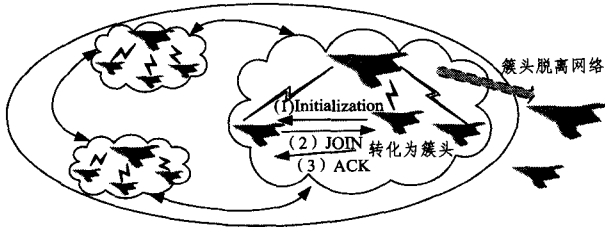


图 11 成簇模式中心节点替换示意图

3.4 移动管理

当无人机从一个控制中心的通信范围移出,进入到另一个控制中心的监控领域时,称之为越区切换,需要进行移动管理。

当控制中心监测到来自无人机的信号强度和低于某个门限时,代表无人机要脱离该控制中心的监控领域,需要向另一个控制中心切换。处在无人机周围的所有控制中心都监测无人机的信号,并把监测结果反馈给当前无人机的控制中心。然后该控制中心从中选择一个最佳控制中心作为越区切换的新控制中心,并把结果告知无人机和被选出的新控制中心,整个切换的执行如图 12 所示。

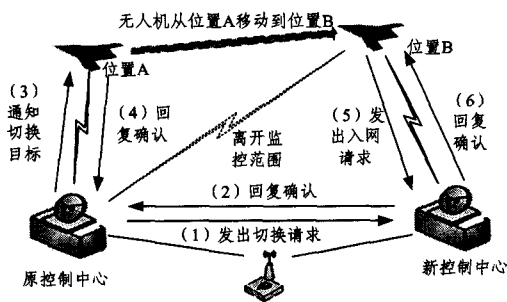


图 12 移动管理示意图

(1)旧控制中心向目标控制中心发出切换请求,请求将该

无人机加入其监控子网中;(2)目标控制中心收到通知,判断是否能够监测到该无人机信号,并判断其监控子网是否适合加入新的节点,如果合适则向旧控制中心回复确认;(3)旧控制中心收到目标控制中心的确认后,通知该无人机切换的目标控制中心及其信息;(4)无人机收到通知,回复确认,旧控制中心从监控子网删除该节点的成员信息;(5)无人机向目标控制中心发送入网请求;(6)目标控制中心回应,并将其加入其子网,切换过程执行完毕。

这种切换策略,由控制中心判断切换时间和对象等,既满足了无人机自组织网络无基础设施的特性,又能适应系统当前的通信协议,减少不必要的带宽浪费。

3.5 组网模式切换

一般来说,无人机群都有特定的任务,在从控制中心发出来时,就制定了其组网模式。但是,当任务临时发生变化时,已经被发出去的无人机集群需要迅速调整拓扑,重建链路,在空中实现组网模式的切换,以适应任务需求的变化。

(1)全联通的对等模式切换到成簇的分级模式

本来构成全联通的对等模式的无人机集群在收到控制中心的成簇命令后,执行成簇算法(Clustering)成簇,然后按轮在时间上周期运行。

首先,无人机要竞争簇头,满足要求的节点根据一定的算法随机当选为簇头。成功当选的簇头节点广播初始化消息 Initialization,其他尚未成簇的普通节点接收到 Initialization 消息后,随机竞争信道发送 JOIN 消息回应簇头加入该簇。簇头收到 JOIN 消息后,回发 ACK 消息,并为该节点分配在簇内的编号 CID,成簇完成,其模式切换的过程如图 13 所示。

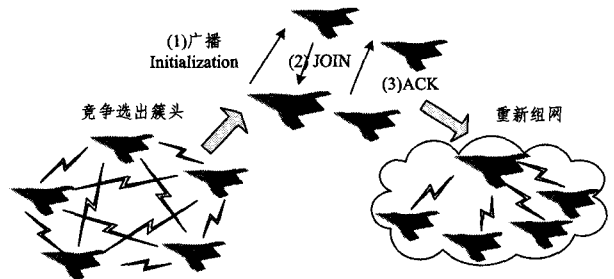


图 13 全联通的对等模式切换到成簇的分级模式示意图

(2)成簇的分级模式切换到全联通的对等模式

本来成簇的无人机集群在接到控制中心的全联通组网命令后,簇头节点要降级为普通节点,簇内节点也不再只能与簇头进行通信,而是可以与在其通信范围内的所有节点直接通信,联成对等的网络。

切换过程如图 14 所示,簇头节点收到控制中心退簇的消息后,向其簇内成员发送 QUIT 消息,节点收到 QUIT 消息后回复 ACK,退簇成功。随后,所有节点都向其通信范围内的节点广播 HELLO 消息进行邻居节点的探测并建立邻居表,完成全联通的对等模式的切换。

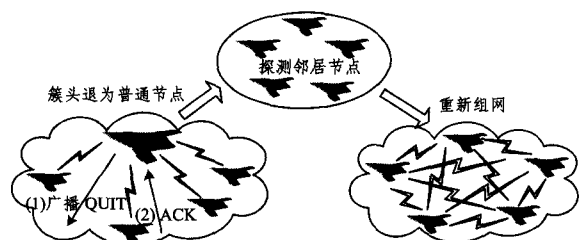


图 14 成簇的分级模式切换到全联通的对等模式示意图

结束语 本文针对无人机网络的特殊性和实际运用中多种可能出现的情况,提出了一种高动态自组织的体系架构和网络管理方案。与以往的研究相比,本文的主要工作在于以下几个方面:

(1)宏观上从组网通信模式、时间帧设计、MAC调度和路由选路4个方面对无人机自组织网络的体系架构进行了系统的设计。

(2)提供了两种组网模式并且实现了两种模式的自主切换,突破了以往无人机系统组网模式设计单一的局限性。

(3)基于系统的两种组网模式,在设计系统架构的基础上,提出了网络的具体管理方式,实现了无人机网络的自主管理。

综上所述,本文通过对无人机自组织网络的多方面研究,提出了新的体系架构和管理方式,并进行了详细的设计,为无人机技术向集群化、智能化和网络化方向发展提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] 徐琳. 无人机控制数据链跳频时频同步关键技术研[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
- [2] Wesler M M, Lucas J R, Gallimore J J, et al. Managing uninhabited aerial vehicle (UAV) information employing a reduced area/depth separated display[C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. SAGE Publications, 1999, 43(1): 91-95
- [3] Johnson L F, Herwitz S, Dunagan S, et al. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV[C]//Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2003, 20: 845-849
- [4] Sugihara R, Gupta R K. Optimal speed control of mobile node for data collection in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, January 2010, 9(1): 127-139
- [5] Zhao W, Ammar M, Zegura E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. ACM, 2004; 187-198
- [6] 葛扬帆. 应用于无人机集群的路由协议研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012
- [7] 吴平, 唐文照. 无人机集群数据链组网技术研究[J]. 空间电子技术, 2012, 3: 16
- [8] Lei H, Perkins C. Ad hoc networking with mobile IP[C]//Mthe Second European Personal Mobile Communications Conference (EPMCC, 97). Bonn, Germany, 1997; 197-202
- [9] 张程, 朱庆生, 陈自郁, 等. 基于移动自组网的服务发现体系结构设计[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 70-75
- [10] Chlamtac L, Conti M, Liu J J N. Mobile Ad Hoc networking, imperatives and challenge[J]. Ad hoc Networks, 2003, 1(1): 13-64
- [11] 张可, 张伟, 李炜, 等. 快速移动环境中上下文感知优化链路状态路由协议[J]. 计算机科学, 2011, 38(6): 110-113
- [12] 林林. 基于协同机制的多无人机任务规划研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013
- [13] 张可, 张伟, 李炜, 等. 无人机自组织网络先应式路由协议适应性研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(2): 4-18
- [14] Zhang K, Zhang W, Zeng J Z. Preliminary study of routing and date integrity in mobile Ad hoc UAV network[C]//International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis, 2008(ICACIA 2008). IEEE, 2008; 347-350
- [15] Brown T X, Argrow B, Dixon C, et al. Ad hoc UAV-ground network (AUGNet) test bed[C]//Proceedings of the 4th Scandinavian workshop on wireless ad-hoc networks Stockholm. Sweden, 2004
- [16] Raissi-Dehkordi M, Chandrashekar K, Baras J S. UAV placement for enhanced connectivity in wireless ad-hoc networks [OL]. http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/6445/1/TR_2004-34.pdf
- [17] 张程, 朱庆生, 陈自郁, 等. 基于移动自组网的服务发现体系结构设计[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 70-75
- [18] 姚敏, 王绪芝, 赵敏. 无人机群协同作战任务分配方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(5): 723-727
- (上接第 49 页)
- [7] Yang Fan, Qian Ya-li. Two Different Schemes of Authentication in IEEE802. 16j Multi-hop Relay Network[C]//2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China, 2012; 1-4
- [8] Huang Jie, Huang Chin-Tser. Secure Mutual Authentication Protocols for Mobile Multi-hop Relay Wimax Networks against Rogue Base/Relay Stations[C]//2011 IEEE International Conference on Communications. Kyoto, Japan, 2011; 1-5
- [9] 郎为民, 刘波. WiMAX 技术原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008
- [10] Anju B, Ramesh P, Chaurasia B K. Traffic Analysis for WiMAX [C]// 2013 5th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. Mathura, India, 2013; 138-140
- [11] Stuart J. WiMAX Subscriber and Mobile Station Authentication Challenges [J]. IEEE communications Magazine, 2011, 49(11): 166-172
- [12] Sun Hung-min, Chang Shih-Ying, Lin Yue-Hsun, et al. Efficient Authentication Schemes for Handover in Mobile WiMax [C]// Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Kaohsiung, Taiwan, 2008, 3: 235-240
- [13] Kleinrock L. Queueing Systems volume 1 [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1975: 126-137