

无人机自组网络通信体系结构系统设计^①

徐志明^② * ** *** 朱精果 * **

(* 中国科学院光电研究院 北京 100190)

(** 中国科学院研究生院 北京 100049)

(*** 中国酒泉卫星发射中心 酒泉 732750)

摘 要 针对现有移动自组网(MANETs)TCP/IP 五层体系结构通信效率低、不适合高动态交互式应用的问题,进行了无人机自组网新型通信体系结构研究。首先设计了具有代表性的应用场景,结合无人机自组网的特点,对通信体系需求进行分析,在此基础上,系统设计了通信体系结构。该结构采用具有动态认识、管理和维护功能的认知平面和具有高效数据通信功能的数据平面并行交互,其中,认知平面运用认知无线电等技术,包括发现引导、拓扑控制、移动测量和信道监控等功能模块;数据平面运用多重无线电等技术,包括高速智能的 PHY 层、可靠组播通信层和任务关键性的任务层等。对各层的关键技术进行了分析,并通过仿真演示说明了体系结构的可行性。该体系结构也适用于其它移动平台自组网。

关键词 无人机,自组网络,通信体系结构,认知,系统设计

0 引言

由无人机空中组网形成的协作自治系统,在很少地面干预下能实现自主协调和一体化联合行动,能执行高级别的任务,有着广阔的应用前景^[1]。在发生大地震、森林火灾等重大灾害时,在受灾地区上空可利用不同功能的无人机组网实施近空监测、评估告警、人员搜索、应急空投和自动爆破等,这种协作自治系统的无可比拟的联合行动优势将会得到充分发挥。

通信体系结构是无人机组网整体设计的核心内容之一,是无人机相互之间协调、控制和传输的核心,直接影响到网络无人机执行任务的成败。研究设计适合无人机无线网络的通信体系结构,从而提高通信效率,保证执行即发现即行动等时敏性动作的质量和可靠性。

国外无人机自组网络通信研究尚处于初级阶段,国内针对无人机自组网络通信体系结构的研究较少,在无人机网络通信方面,主要是基于地面(站)控制及传统链路方面的研究。美国 Colorado 大学基于 Ad Hoc 研究了无人机组网技术^[2,3];Johns Hopkins 大学提出了基于 Ad Hoc 扩展的无人机群通信体系

结构^[4]。实际上,移动自组网络(mobile ad hoc network, MANET)采用 INTERNET 最主要的体系结构——TCP/IP 五层结构。这种方案通信效率低(先天性缺陷),不适用于高度动态、实时多媒体传输、多架无人机组网,其结构未从根本上解决通信效率和质量问题。为应对节点移动性,提高通信效率,保证通信质量及安全,目前,国内外主要对 TCP/IP 五层结构协议进行适应性改进,如移动 IP、改进 TCP;增层或虚拟层扩展,如 IPsec、MPLS 和 HIP^[5],但这种“补丁”式地改进系统结构,会导致整体效能降低。此外,针对无线网络研究跨层设计^[6,7],INTERNET 采用控制平面^[8],精简重复操作,支持动态服务组合的结构^[9],这些均不能很好地适用于动态无线网络环境。无人机自组网要有与其功能特点相适应的动态的新型无线通信体系结构,本文给出的系统采用双平面设计,运用认知无线电、多重无线电等技术,将载荷数据传输与动态控制管理功能有机结合,技术分析和仿真实验表明该设计具有可行性。

1 应用设想场景

无人机自组网应用设想场景如图 1 所示,在地

^① 863 计划(2008AA021103)资助项目。

^② 男,1971 年生,博士,高级工程师;研究方向:网络体系结构,无线通信,联系人, E-mail:zhimingxu2006@gmail.com (收稿日期:2009-04-22)

震受灾上空部署多架无人机,区域分片,以集群为主要形式,组成智能一体化的无线网络(本文称 UAVs-Net),以发挥无人机群整合优势。本设想场景中的网络无人机分类及大致数量为:侦察成像、硫氢探测等各种传感型无人机数十架,数据中继、定位导航等通信型无人机数架,与地震救援中心链接的指挥协调无人机 1 架,应急空投、搜救等主动型无人机数十架。传感型无人机的数据经过网络融合直接传输到主动型无人机,紧急情况下主动型无人机直接判决并进行搜救、空投等自主行动;在一定区域无人机相对密集的情况下,也可通过指挥协调无人机合理协调分配主动型无人机任务并避免空中碰撞,指挥协调无人机同时与地面部队信息交互。

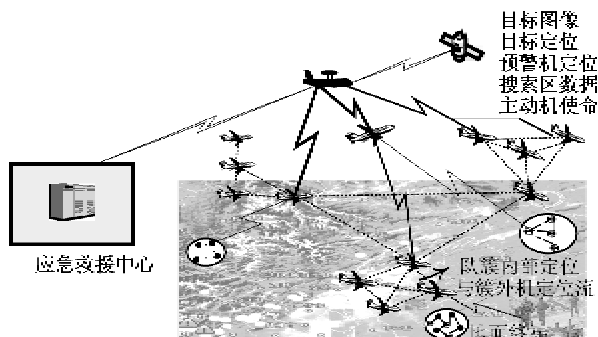


图 1 无人机自组网应用设想场景

数据流大致分布:在机集群内,数架传感型无人机间交换融合数据,传至主动机和中继机,主动机接收判别,启动相应程序,采取主动行为,离开或再入集群;内部还有定位流。而在机集群间,以簇头为主要枢纽,交换数据及定位信息,可能合并集群或改变它们的飞行姿态、遍历方式等。中继机承担集群间联络任务,并向救援中心传送数据。预警机自主接收来自传感型无人机或救灾中心的信息,如方位、强度、风险等级等,迅即向相关集群发送指令。

2 需求分析

2.1 满足不同需求

体系结构设计需要考虑支持任务、应用、用户、系统设备和环境的网络功能和性能需求。UAVs-Net 通信体系结构总体上应体现整体动态灵活性,动中通,动中控,动中交。

例如,地震发生时间短、波及范围大,为抢救人员和控制灾情,UAVs-Net 必须满足实时或交互式的应用要求,如实时图像等数据、分布式(虚拟)应用要求、与中心高清晰交互视频等时敏性应用要求,而且

可预测高性能的网络时延等需求。满足速率关键的应用,可预测高性能容量需求。满足任务关键的应用,正确的时间将正确的数据传到正确的无人机执行正确的动作。满足“一对多”的应用,如数据的分发;“多对一(多)”的应用,如传感型数据向中继无人机及指挥中心等汇聚。

2.2 高度动态性

应适应网络无人机高度动态性、智能化,无人机通信节点应具备本身及环境状态认知应对能力,确保动态下(如无人机加离引起网络拓扑变化、信道变化、频谱移动等)必要通信正常进行。从体系结构上有利于隐藏终端和暴露终端问题的解决。

2.3 具有较强生存能力

结构上方便网络状态维修、拥塞控制、功率控制等有效管理,网络具有较强的生存能力。

3 通信体系结构

INTERNET 最重要的 TCP/IP 五层体系结构(图 2)最大的成功在于模块化协议分层和网络透明性带来了多方面的灵活性,模块化和抽象性是计算机科学思想的核心原则^[10]。考虑无人机组网需求,UAVs-Net 通信体系结构坚持纵向层次化和横向并行处理设计原则,便于模块化、灵活性和兼容性,总体设计如图 3 所示。

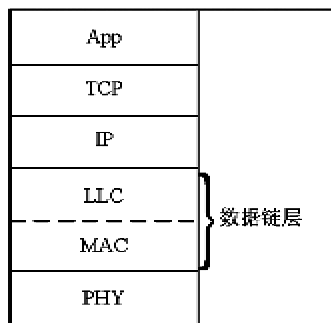


图 2 UAVs-Net 通信体系结构

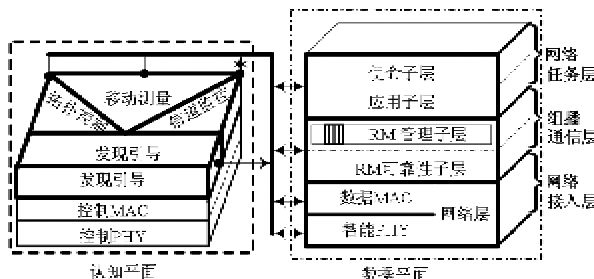


图 3 移动 Ad hoc 网络体系结构

3.1 认知平面

认知平面用于 UAVs - Net 动态信息的认知推理、控制和配置无人机网络相应动态参数,引导、测量和修复数据平面,将较为复杂的动态信息认知和主要的管理控制从传统单一平面分离,并与数据平面层相关,实现数据平面分层结构的优化,保证数据平面高效实时传输数据。

3.1.1 发现引导

认知平面极为重要的部分是发现引导协议。该协议的主要功能是无人机节点的网络启动,建立本地可达性,维护链路状态、能量状态、信道/频谱状态和有关测量等信息。如识别并与之建立双向链路,与 1-跳的邻居协商这些状态,继而找无人机节点对称 2-跳所有链路(邻居的邻居,即 2-跳双向链路)状态,录入信息库等。发现引导协议是主动动态建立并维持路由动态优化的基础,通过数据结构信息库来刻画无人机节点“动态图”,即本地信息库、接口信息库和无人机节点信息库。维护管理有关物理参数、接口地址、链路及可选路径权重值等。

UAVs-Net 建立起来后,网络无人机节点在认知平面周期性地受限广播其更新信标,告示并汇集功率变化、节点拓扑变化、信道变化等动态信息,并与数据平面交互。对于高度动态的无人机网络来说,链路质量状态评估很重要,可以主动决定路由选取,确保通信顺畅。

根据 Friis 方程,路径损失与收发机间的距离及信号频率有关,因此,在 UAVs-Net 中,认知平面与数据平面信道频率要合理选择,考虑动态性,限制信标在物理层或媒体接入控制(MAC)层广播,结合移动测量,路径权重算法要快速收敛,还应考虑不可避免的干扰、能量有效及链路双向性判断问题,以及受物理层、MAC 层和网络吞吐量的影响。

在认知平面移动测量提供已知条件下,无人机间的直接链路状态和路径权重计算方法如式

$$\begin{aligned} \vec{L}_{i,i+1} = & \min\{f_{\text{map}}(\text{SINR}_{i,i+1}), R_{\text{max}(i+1)}\} \\ & \cdot \min\{\rho_{\text{MAC}i}, \rho_{\text{MAC}i+1}\} \cdot \max^{-1}\{\Gamma_i, \Gamma_{i+1}\} \end{aligned} \quad (1)$$

所示。式中 $\vec{L}_{i,i+1}$ 为 i 到其直接邻居的链路权重; $\rho_{\text{MAC}} \in [0,1]$ 为 MAC 占空比,反映信道忙闲,本地 MAC 统计由信标传出; Γ 为接收机阈值。

$f_{\text{map}}(\text{SINR}_{i,i+1})$ 为相对映射函数,由文献[11, 12]推导得到:

$$f_{\text{map}}(\text{SINR}_{i,i+1}) = R_{\text{max}i}$$

$$= f_{\text{map}} \left(\frac{P_{\text{RX}i}(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma}{(N_0 + \sum_{l=1}^k I_{l \rightarrow i+1})} \right) \quad (2)$$

式中 $P_{\text{RX}i}$ 为 i 最大接收功率; d_0 为远场距离; d 为两无人机间距, γ 典型值取 2-6 之间; $\sum_{l=1}^k I_{l \rightarrow i}$ 为对 j 干扰的源功率,在特定条件下最小化。

$$\begin{aligned} \text{当 } \text{SINR}_{i,i+1} < \text{SINR}_{\text{imin}} (= f_{\text{map}}(\Gamma_{(i+1)\text{min}})) \text{ 时,} \\ \vec{L}_{i,(i+1)} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

此为单向链路,作为可靠或不可靠传输判决因素之一; $\Gamma_{(i+1)\text{min}}$ 为 $i+1$ 无人机无线接收机阈值。

链路聚合为路径,端对端的权重定义为

$$\vec{w}_{ij} = \prod_{i=1}^{j-1} \vec{L}_{i,i+1} \quad (4)$$

式(4)表明,单一链路失效会导致整个原路径失效,需要改径并重新计算权重。据此在路径建立时或通信过程中,应考虑负载平衡并优化路径选择,使基本的通信 QoS 得到保证。

链路质量取决于链路两端节点的相关参数“比较”,即:信号干扰噪声比(SINR)(最大值相当于其即时接收最大速率)、最大发送速率、接收阈值(可靠传输考虑双向性)、信道接入忙闲等,直接链路的权重定义为“比较”后的乘性结果,反映该链路实际吞吐能力。

3.1.2 拓扑控制

组网无人机一般有高机动、长航时等要求,拓扑控制是保持通信有效、能量节省的必要条件,主要包括飞行控制保持和通信功率有效控制,本文强调功率控制。

无人机均以相同的固定功率运行会造成两个问题,一是因数据流量不均匀分布直接造成不均匀的能量消耗,一些无人机会因耗尽能量而使局部或整个网络系统瘫痪;二是接收机功率高于必需的 SINR 而浪费发送端无人机能量。因此一方面针对特定的无人机进行流量规划和能量增强配置,另一方面实行灵活的功率控制,从而调节通信距离,允许并行传输通信,这也即提高了网络信道利用率和整体吞吐量。

通信距离与吞吐量成反比^[13],通信距离控制适当,允许多径或多路并行传输成为可能,从而提高网络吞吐量,但通信距离太小,会导致网络分割。因此,选择合适的功率,既保证最优化的功率低等级,同时满足网络连接性,是功率控制的主要内容之一。

关于功率控制,在传统单一平面的五层体系结构中,是归结在网络层还是 MAC 层,一直有争议,但实际上功率控制必然要引起这两个层交互作用的,放入认知平面,进行集中控制,满足网络动态性及节能要求。对于碰撞避免信息(collision avoidance information, CAI)及相关协议^[14],如双忙音多址访问协议(dual busy-tone multiple access, DBTMA)就可以发挥认知平面的作用。实际上,由预期接收机计算合适的发射功率等级是有意义的,因为它清楚地知道自己承受的干扰阈值及比发射机更能决定潜在的邻居干扰问题,这也是功率控制的一部分。

3.1.3 移动测量

移动测量粗粒度是测距测速定位等问题,细粒度是通信半径、链路或路径的持续时间、剩余时间和连接时间等与路由选择紧密相关的参数测量,移动测量并与无人机的自动控制系统关联,目的是移动感知,预知 UAVs-Net 拓扑变化从而控制、预测发现运动引起的链路变化趋势,源或接收机在预先的路径即将失效前重新选择质量好的通路,使无人机在高度动态网络中保证数据通信正常进行,这样的路由协议应对无人机运动性有更大的弹性。定位可以基于 GPS 或“北斗”定位系统,如现有基于 GPS 定位的 DREAM、LAR 路由协议。对于超宽带(UWB)通信的 UAVs-Net,还可利用 UWB 纳秒至微微秒级非正弦波窄脉冲传输数据,极短的脉冲其时间、空间分辨能力均很高,具有传输速率高、定位精确的特性,可以实现动态定位。

3.1.4 信道监控

对于 UAVs-Net 来说,信道监控是对无线信道状态监视预知并进行自适应控制,与数据平面的智能

物理(PHY)层共同实现对一定的信道或频谱感知、分配和切换操作进行管理,并与数据平面的相关层协调配置,使频谱移动相对平滑,最低程度影响正在或计划中的数据通信 QoS。对于路由选择来说,建立的路由可能因无人机的运动性和信道的可用性而改变。信道监控可提供适应于频谱波动下的路由选择和数据平面物理层配置。信道或频谱动态性会引起分组丢失率变化,导致 MAC 层接入引入时延,从而影响网络层和组播层面的性能。频谱切换对通信质量影响较大,要从硬切换“中断-扫描-连接-认证”变到软切换“扫描-预连接-认证-中断-连接”,对数据平面的任务层甚至组播层来说,实现无缝连接为最佳。同时,信道监控还要通过认知平面区别造成难以接收的“传输时延”的性质,是数据平面的路径拥塞引起还是频谱动态切换过程引起的,正确启用拥塞控制机制,以防陡降网络吞吐量和增加额外时延。由此可见,信道监控与数据平面的各层发生关联,还可与数据平面物理层共同实现信号衰减预先自适应,信道监控是实现 UAVs-Net 高度智能化的重要基础。

3.2 数据平面

数据平面适应无人机节点的高度动态性,选择合适路径,保证数据安全、及时、高效、正确地传输。网络层融合在 PHY 层和 MAC 层,出于三方面考虑:一是便于三层硬件实现,提高处理速度;二是将网络层的部分功能下降到物理层,如 Routing Tables 被推入高速 PHY 层等,使系统结构更具灵活性;三是考虑与现有网络兼容(互联)。基于 MAC 层也可实现组播业务。如图 4 点划线所示。

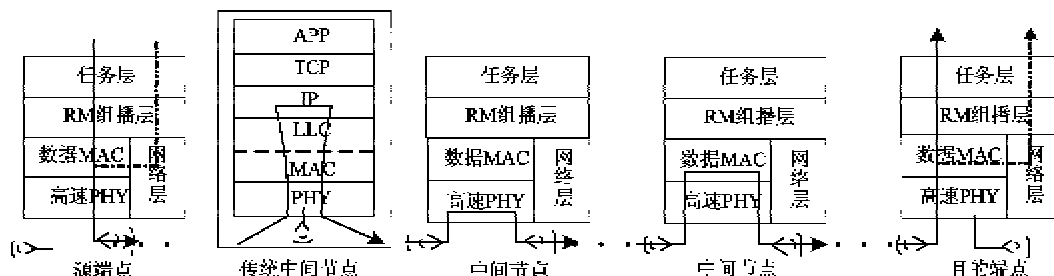


图 4 数据平面分层及数据流比较

3.2.1 智能 PHY

传统中继节点转发数据分组常需经过网络层(IP),不可避免转发排队、重传退避接入排队等带来的时延,如图 4 实线方框代表传统结构中继流,由此

提出了物理层中继结合路径接入的超低时延体系结构^[15],这种改造相当于在层次协议栈之间运用并行处理技术,可大大提高通信效率。为实现可靠组播传输,UAVs-Net 的网络层设计与 PHY 层交叉,便于

高效兼容。对于 UAVs-Net 来说,组播是其传输的主要模式,直接在物理层复制分组并按路径转发,同时每架无人机可进行双重无线电配置^[16],就可以实现一架无人机能同时在 2 个信道发送数据分组,多径传输;转发无人机能同时发送和接收数据分组,更有助于提高组播效能,通常要比传统网络快捷高效数量级。

PHY 层采用认知无线电技术^[17],具有多频谱接口并与认知平面的频谱管理协作,具有一定的频谱感知、分配和切换能力,如发射端能考虑对其它终端干扰和接收端的干扰,必要时切换频率。

3.2.2 MAC 层

UAVs-Net 信道资源有限,无线底层处于多变环境且传输质量也较差,没有可靠的中心控制点,因此需要 MAC 层点对点地协调解决冲突和公平性问题,是实现端对端性能的重要基础。在物理层提供比特流的基础上,在通信的无人机之间建立点到点的数据传输链路,具备近距差错、拥塞和流量控制等功能(在智能 PHY 层实现转发这些功能必需的),使物理层的比特流相对 RM 组播层透明,管理控制物理媒质接入、多路复用与解复用,建立/释放多路通路,同时 MAC 适应 UAVs-Net 双重无线电环境下的接入模式。对于数量较大的 UAVs-Net,MAC 充分考虑暴露和隐藏终端问题。无人机 MAC 层协议要支持实时、组播和基于优先级的业务。

3.2.3 RM 组播层

在高速运动的无人机组网络中,广播洪泛会大量消耗网络容量,影响传输效率。由于网络无人机的功能性质,流量基本上可规划,组播能够很好地节约网络资源,实时高效“一对多”或“多对一(多)”数据传输、音视频等多媒体业务,因此,组播应成为 UAVs-Net 最重要的传输手段。组播可基于物理层、网络层或应用子层等实现,有的组播还具有单播协议的功能,如适合高速动态的 ODMRP^[18]就是基于 Mesh 的组播路由协议,建立具有冗余路径的组播网,使组播路径有较强的健壮性,配置了 ODMRP 的 UAVs-Net 无需再添加一个独立的单播协议。RM 可靠组播层与 TCP 层功能类似,为任务层提供可靠数据流服务,分为管理子层和可靠性子层。管理子层实现会话连接的建立与释放、压缩与解压缩等功能;可靠性子层实现数据的可靠传输。数据平面的组播层与认知平面的移动测量接合起来,就可以合理地选择组播协议中的路由刷新间隔时间和转发组超时时间间隔时间的定时值,使之自适应网络环境如移

动模式、移动速度和信道容量等。

无人机组网络要满足不同流量、服务、时延和吞吐量的要求。应用级的吞吐量预计将会在数十到数百 Mbps 数量级直至 Gbps 级,时延将达到数百 ms 直至数 ms 数量级。而软件支持的高层通信处理功能比传输媒介低几个数量级,网格计算环境的发展趋向于分布式和并行处理系统^[19],在数据平面层次协议栈内 RM 组播层可以运用并行处理技术,尤其是管理子层。将流控制、差错控制、寻址、排序和重排序、重传、连接选择等按并行化处理,消除功能冗余,提高通信层处理效率。

3.2.4 任务层

聚合一定数量通用和特定任务的应用程序,执行某一具体任务使命。由于不同的无人机通过“任务环”分工协作运动,因此任务层分为使命子层和应用子层。使命子层可划分“进入/回收”、“目标搜索”、“目标识别”、“实施主动”、“情势评估”几个使命。突出无人机组网任务关键性的目标,将复杂的系统任务进行分解,便于网内无人机之间、无人机网与外界之间协调控制,也便于质量层次性保证。如根据网络状态在每个不同的使命模式,可以进行有差别的灵活 QoS 保证,如应向“实施主动”模式的无人机提供最高质量、最低时延的影像传输。应用子层,提供通用和特定任务的应用程序,根据用户(无人机或指挥员)需求,确定应用程序进程之间通信的性质,并提供信息交换所需的功能;通过选择无人机节点实现对 RM 组播通信层服务的动态定制。使命子层,提供来自应用子层、完成一项具体任务使命所必需的特定应用程序集合,将任务分解成若干个具体使命,确定完成这些使命所需的应用程序,并按执行顺序完成调用,将信息数据按任务使命转换成系统或联网终端用户的有用信息。

4 仿真实验

考虑到链路状态判断及灵活选择是双平面设计的本质之一,我们利用 OPNET 仿真演示了认知平面的认识功能及对数据平面的通信影响。仿真节点模型如图 5 所示,其中 APP 模块实现数据收发功能,DataPlane 实现数据平面相关功能,CognitionPlane 实现认知平面相关功能。节点全双工通信,单向链路存在的概率是 0.02,采用加性高斯白噪声(AWGN)无线信道模型,500m × 500m 范围,10 个节点,分组大小 512byte,基于 AODV,仿真时间 100s,速度 6m/s。

仿真移动测量 + 发现过程中,利用仿真工具中的节点测距定位功能组合,A 节点通过认知平面测量 B 节点的移动速度和相对距离,当之间距离快超过通信范围后,A 节点认知并提前主动将数据平面路由表项切换到使用 C 点(如图 6 示意)。仿真结果如图 7 所示。

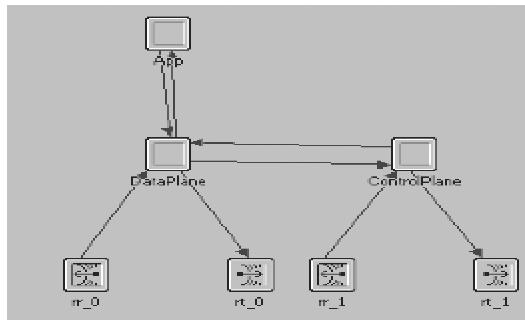


图 5 节点模型

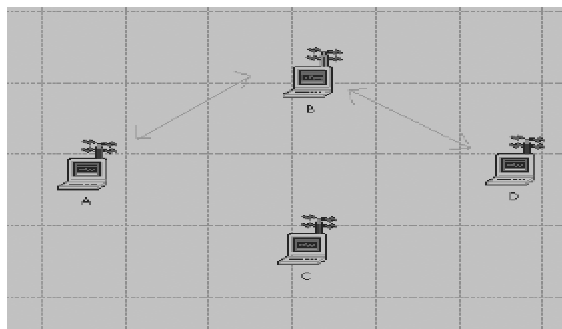


图 6 仿真场景示意

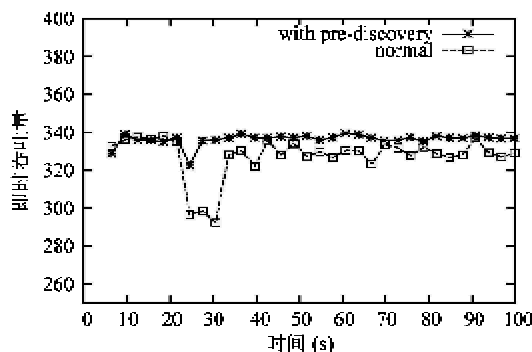


图 7 仿真结果

从图中可以看出,认识平面主动检测链路质量与数据平面作用。在数据通信的同时,认知平面不断感知判断链路状态,动态更新链路信息,当预知链路可能发生断开时,与数据平面交互,更新其路由表,并主动提前切换路径,切换时吞吐量产生了 12kbps 较小抖动后趋稳,约 4s 过渡,由于链路状态始终可认知,因此具有提前状态发现的网络吞吐量起伏相对平稳。而传统中断-被动查找-链接方法,

对链路状态把握被动,网络吞吐量振荡影响较大,吞吐量最大改变量 50kbps,持续 15s。

由于本文提出系统设计架构,整个通信体系结构的系统仿真,需要建立无人机运动模型和合理环境的仿真测试平台,结合认知或数据平面的具体模块进行(后续任务)。

5 结论

分析了无人机自组网络通信体系结构应用需求及其特点,系统地设计了通信体系架构,该体系结构具有以下特点:

(1)双平面设计,集成无人机网络状态“监控”功能,使无人机网络更好地自适应高度动态环境,真正实现智能化,数据平面运行在高速高能量模式,满足多媒体实时传输需要,还可具备休眠功能。

(2)认知平面运行在低速低能耗模式,维系网络基本运行,认知控制与无人机及网络环境紧密相关的动态参数,通过 APIs 为数据平面跨层交互提供平台。

(3)智能融合的物理层具有高效地转发数据分组、信道/频谱感知和切换能力,提高数据传输能力,适应复杂电磁环境。

(4)组播管理子层单元并行可靠性设计,降低软件运行 OS 开销花费的时延。

(5)任务层的设计,提出按应用分类操作原则,适应网络无人机在自治协调下发挥各自功能优势,便于 QoS 层级保证。

我们已经设计出了基于认知和数据平面的具体信道/频谱切换策略,研究完成适合高动态组网的多播路由协议。下一步将对 MAC 高效接入、建立无人机自组网络仿真测试平台等技术进行研究。

参考文献

- [1] Samad T, Bay J S, Godbole D. Network-centric systems for military operations in urban terrain: the role of UAVs. *Proceedings of the IEEE*, 2007. 95(1): 92-107
- [2] Elston J, Frew E, Argrow B. Networked UAV command control and communication. In: *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Colorado, USA, 2006. 1-9
- [3] Brown T X, Argrow B, Dixon C, et al. Ad hoc UAV-ground network (AUGNET) test bed. In: *Proceedings of the 4th Scandinavian Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, Stockholm Sweden, 2004. 1-5
- [4] Bamberger R J, Scheidt D H, Hawthorne R C, et al. Wireless network communications architecture for swarms of small

- UAVs. In: Proceedings of the AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, Chicago, USA, 2004. 1-8
- [5] Moskowitz R, Nikander P. Host identity protocol (HIP) architecture. RFC 4423, 2006
- [6] Srivastava V, Motani M. Cross-layer design: a survey and the road ahead. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(2): 112-119
- [7] Winter R, Schiller J H, Nikaein N, et al. CrossTalk: cross-layer decision support based on global knowledge. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(1): 93-99
- [8] Raychaudhuri D, Mandayam N B, Evans J B, et al. CogNet: an architectural foundation for experimental cognitive radio networks within the future Internet. In: Proceedings of the 2006 ACM Mobility in the Evolving Internet Architecture, San Francisco, USA, 2006. 11-16
- [9] Touch J D, Wang Y S, Pingali V. A recursive network architecture. ISI-TR-2006-626, <http://www.isi.edu/touch/pubs/isi-tr-2006-626/isi-tr-2006-626.pdf>
- [10] Clark D D, Sollins K, Wroclawski J, et al. New Arch: future generation Internet architecture. FINAL TECHNICAL REPORT, 2003
- [11] Rappaport T S. Wireless communication-Principles and Practice. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002. 107
- [12] Sklar B. Digital communications-Fundamentals and Applications (2nd Edition). Communications Engineering Services, California and University of California, 2005. 118-119
- [13] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. http://black.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps_files/compow_ewc_2002.pdf.
- [14] Krunz M, Muqattash A, Lee S J. Transmission power control in wireless ad hoc networks: challenges, solutions, and open Issues. *IEEE Network*, 2004, 18(5): 8-14
- [15] Ramanathan R. Challenges: a radically new architecture for next generation mobile ad hoc networks. In: Proceedings of the 2005 ACM Mobility in the Evolving Internet Architecture, Cologne, Germany, 2005. 132-139
- [16] Bahl P, Adya A, Padhye J, et al. Reconsidering wireless Systems with multiple radios. *ACM SIGCOMM, Computer Communications Review*, 2004, 34(5): 39-46
- [17] 周小飞, 张宏纲等. 认知无线电原理及应用. 北京: 邮电大学出版社, 2007. 1-38
- [18] Lee S J, Su W, Gerla M. On-demand multicast routing protocol in multihop wireless mobile networks. http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/PAPER/sjlee_monet.ps.gz, 2001
- [19] Feldmeier D C. A framework of architecture concepts for high-speed communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 1993, 11(4): 480-488

System design on communication architecture for unmanned aerial vehicles ad hoc networks

Xu Zhiming* ** ***, Zhu Jingguo* **

(* Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(** Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(*** Jiuquan Satellite Launching Center, Jiuquan 732750)

Abstract

Aiming at the problem that the five-layer TCP/IP main communication framework of the existing mobile ad hoc networks (MANETs) has a low communication efficiency and especially misfits high dynamic and interactive applications, the authors presented a novel communication architecture for UAVs (unmanned aerial vehicles) ad hoc networks. Firstly, they imagined a representative application scenario and analyzed the communication system requirements according to the UAVs network characteristics, and then, designed the communication architecture systematically. This architecture employed the cognition plane with dynamically cognizing, managing and maintaining functions and the data plane with more efficient data traffic functions to interact in parallel. The cognition plane was grounded on cognitive radio techniques, including discovery bootstrap, topology control, mobile measurement and channel monitor modules, and the data plane was based on cognitive and multiple radios, including high-speed intellectualized PHY layer, reliable multicast communication layer and mission-centric mission layer, etc.. The analyses of the key technologies of the layering system and the simulation were conducted, and the results showed feasibility of the communication architecture. It also applies to other mobile platform self-organizing networks.

Key words: unmanned vehicles, ad hoc networks, communication architecture, cognition, system design