

## 机载网络体系结构及其协议栈研究进展\*

梁一鑫<sup>1,2,3</sup>, 程光<sup>1,3</sup>, 郭晓军<sup>1,3</sup>, 周爱平<sup>1,3</sup>



<sup>1</sup>(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

<sup>2</sup>(兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

<sup>3</sup>(计算机网络和信息集成教育部重点实验室(东南大学), 江苏 南京 211189)

通讯作者: 程光, E-mail: gcheng@njnet.edu.cn

**摘要:** 随着空中任务的不断增加,尤其是无人机的迅速发展,机载通信需求的快速增长促使机载通信向网络化的方向不断发展。作为连接卫星网络和地面网络的空中通信重要枢纽,机载网络具有诸多区别于无线移动网络的新特征,包括大尺度三维稀疏分布场景、长传输范围、移动轨迹可预测、高速移动、高动态拓扑和分群结构等。这也使得其在体系结构和协议栈设计上面临新的挑战,成为学术界和产业界的研究热点。首先,对机载网络体系结构和网络特征作了介绍;进而,重点对 MAC 协议、路由协议和传输控制协议 3 个方面的研究进展进行了系统的综述;最后,讨论了机载网络研究存在的一些问题和需要进一步研究的方向。

**关键词:** 机载网络;体系结构;MAC 协议;路由协议;传输控制协议

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 梁一鑫,程光,郭晓军,周爱平.机载网络体系结构及其协议栈研究进展.软件学报,2016,27(1):96-111.  
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/4925.htm>

英文引用格式: Liang YX, Cheng G, Guo XJ, Zhou AP. Research progress on architecture and protocol stack of the airborne network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(1):96-111 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4925.htm>

### Research Progress on Architecture and Protocol Stack of the Airborne Network

LIANG Yi-Xin<sup>1,2,3</sup>, CHENG Guang<sup>1,3</sup>, GUO Xiao-Jun<sup>1,3</sup>, ZHOU Ai-Ping<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

<sup>2</sup>(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

<sup>3</sup>(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education (Southeast University), Nanjing 211189, China)

**Abstract:** The increase in air missions, coupled with the rapid developing of unmanned aerial vehicles, promotes the development in network oriented airborne communication. As an important hub to connect the air communication satellite networks and terrestrial networks, airborne network has many new features (which are different from the wireless mobile network), such as large-scale three-dimensional distribution sparse scene, long transmission ranges, mobile predictable trajectory, high-speed mobile, high dynamic topology, and clustering structure. Meanwhile, it faces new challenges in its architecture and protocol stack design, thus becomes a hot topic in academia and industry. In this paper, the architecture and characteristics of airborne network are first introduced. Then a systematic summary is provided on the research progress of three important topics: medium access control protocols, routing protocols and transmission control protocols. Finally, problems in current research and future research directions of this area are discussed.

\* 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2015AA015603); 江苏省未来网络创新研究院未来网络前瞻性研究项目(BY2013 095-5-03); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(2011-DZ024)

Foundation item: National High-tech R&D Program of China (863 Program) (2015AA015603); Jiangsu Future Networks Innovation Institute: Prospective Research Project on Future Networks (BY2013095-5-03); Six Talent Peaks of High Level Talents Project of Jiangsu Province (2011-DZ024)

收稿时间: 2015-01-31; 修改时间: 2015-04-09; 采用时间: 2015-09-30; jos 在线出版时间: 2015-11-03

CNKI 网络优先出版: 2015-11-04 17:10:08, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20151104.1710.007.html>

**Key words:** airborne network; architecture; MAC protocol; routing protocol; transmission control protocol

机载网络(或称航空自组网、飞行器自组网)<sup>[1-3]</sup>是以有人或无人驾驶飞机作为空中无线通信发送、接收或转发的节点,以节点间无线通信连接作为链路构建的多跳、动态拓扑、无中心的一种新型移动自组织网络。广阔的覆盖范围、良好的机动性和动态自组织能力,使得机载网络成为在跨洋飞行<sup>[2]</sup>、应急救援<sup>[4]</sup>、目标监控和跟踪<sup>[5]</sup>、空中交通管理<sup>[6]</sup>、环境科学<sup>[7,8]</sup>、通信中继<sup>[9,10]</sup>、协同作战<sup>[11]</sup>等通信基础设施受限环境下,保证设备间连通性、提供网络服务的重要手段,并可作为连接卫星网络和地面网络的重要空中通信枢纽,具有良好的应用前景。

与传统无线移动网络(如无线传感器网络<sup>[12]</sup>、车载网络<sup>[13]</sup>和卫星网络<sup>[14]</sup>等)相比,机载网络有着不同的设计目标和网络特征。在无线传感器网络中,存在节点分布密集、节点能量弱、计算能力低和网络拓扑结构变化较小这样的问题,主要应用于收集和處理网络节点覆盖区域中被感知对象的相关数据。在车载网络中,节点相对于无线传感器网络移动具有更大的灵活性,节点能量和计算能力有了显著的提高,网络拓扑结构变化频繁,但是节点通信能力容易受到障碍物的影响,主要面向车辆通信和交通安全。卫星网络中,节点虽然具有广域覆盖的通信能力,但受限于卫星链路资源有限、部署不灵活以及高时延等问题。相比于传统无线移动网络,机载网络则具有车载网络的灵活性和卫星网络的广域覆盖性,同时也处于更加复杂多变的空中通信环境,传输链路带宽受限、通断变化频繁、误码率高,特别是通信平台的移动性和时效性,导致网络拓扑结构具有较强的时变性和显著的高动态特性。这些特点使得机载网络在体系结构和协议栈设计上面临新的挑战,引起众多科研机构和研究人员的广泛关注。

为解决机载网络设计中的诸多问题,国内外研究机构和科研人员开展了多个相关项目的研究,并解决了一系列关键技术。美国空军研究实验室、加州大学洛杉矶分校等机构开展了 Minuteman<sup>[15]</sup>和 TTNT<sup>[16,17]</sup>等项目研究,澳大利亚的悉尼大学开展了 AANET<sup>[18]</sup>等项目研究,欧盟开展了 ATENAA<sup>[19]</sup>,NEWSKY<sup>[20]</sup>等项目研究。国内的北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学和空军工程大学等高校也相继开展了机载网络方面的研究。在关键技术突破方面,目前机载网络研究的热点主要包括网络体系结构、网络通信协议、移动模型和网络连通性等。作为机载网络研究的基础与关键所在,体系结构与网络协议栈设计是本文关注的重点。

本文详细综述了近年来国内外机载网络体系结构及其协议栈关键技术的研究进展。第 1 节介绍机载网络体系结构的节点组成、通信链路和组网结构。第 2 节描述机载网络节点级、链路级和网络级特征。第 3 节综述机载网络 MAC 协议、路由协议和传输控制协议研究进展。第 4 节讨论机载网络未来的研究方向。最后总结全文。

## 1 机载网络体系结构

### 1.1 节点组成

在不同的应用中,机载网络节点的组成也不尽相同,但一般都由机载电台(短波电台和超短波电台等)、机载天线(通信天线、导航天线和雷达天线等)、传感器、控制器(CPU)、存储器、电源系统和操作系统(如 Linux, VxWorks)等软硬件部分组成<sup>[21,22]</sup>。机载电台可以实现远距离通信,主要由发射机、接收机、控制台、数据处理模块和天线协调器等部分组成。与机载网络通信协议设计相关的传感器类型主要包括距离传感器、加速度传感器、陀螺仪和视频图像传感器等。图 1 描述了节点的组成,其中,实心箭头的方向表示数据在节点中的流动方向。

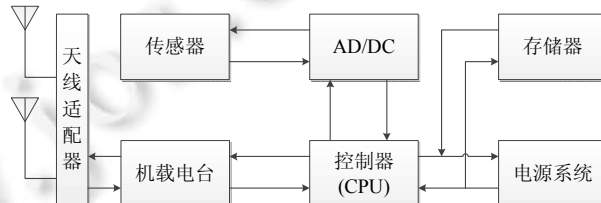


Fig.1 Components in node of airborne network

图 1 机载网络节点的组成

## 1.2 通信链路

(1) 按照机载网络通信技术来划分<sup>[21]</sup>,主要包括短波通信、超短波通信、卫星通信、射频共享雷达通信和无线激光通信等.

- ① 短波通信主要应用于通信距离在水平范围内 300km 以上的语音和数据通信,利用电波经电离层的一次或者多次反射实现几百至几千公里的超视距无线电通信.短波通信具有较强的抗毁性和简单灵活性,在军事应用中具有不可替代的地位;
- ② 超短波通信主要应用于近距离和中距离的视距无线电通信,随着通信技术的发展,基于软件无线电的超短波通信会在未来机载网络中占据重要地位;
- ③ 卫星通信主要是利用通信卫星作为中继的远程通信,能够有效地提高机载网络远程通信的覆盖能力和系统信息传输容量,不过,卫星通信链路容易被干扰、窃听和损毁;
- ④ 射频共享雷达通信主要是将雷达信号与通信信号共同传输,既可保证频谱资源的功用,又可降低飞机设备数量,提高了机载平台设备的使用效率;
- ⑤ 无线激光通信结合了光纤通信和短波通信的优点,保证了通信的容量、传输的抗干扰和保密传输的需求,可以保障未来机载网络通信数据(如语音、数据、图像、视频等)暴涨式增长.

(2) 按照机载网络通信系统类型来划分<sup>[22]</sup>,主要包括宽带无线数字通信系统和数据链系统.

- ① 宽带无线数字通信系统的主要功能是实现数据从发端送到收端的透明传输以及提高数据传输能力.目前,在短距离飞行的小型无人机之间主要采用地面无线高速网络通信标准.考虑到抗干扰性、安全性、远距离通信和军事作战等主要因素,大中型飞机之间主要采用数据链系统;
- ② 数据链系统除了具有数据传送功能之外,还可用于提高与传感器、指控控制或者武器平台等系统协同能力,具有抗干扰性、抗毁性、保密性、可靠性和实时性等多种特征,主要包括 Link4/11/16/22 系列、民航 VHF 数据链、ISR 数据链、网络数据链和激光通信数据链等.相对于开放式的宽带无线数字通信系统,数据链系统大都是针对特殊的任务专门设计的封闭式数据链系统,造成异构数据链系统间的交互性很差.但是,随着软件无线电技术、多输入多输出技术和跳频技术的应用,机载通信将向通用和开放的机载网络方向发展.

## 1.3 组网结构

机载网络依照具体应用的不同,可以有多种网络体系结构<sup>[23,24]</sup>.按其网络结构形式的不同,可分为平面网络结构和分层网络结构.

### (1) 平面网络结构

平面网络结构中,机载网络节点以对等关系组网,并协作完成路由、管理和安全等任务,一般多用于民航飞机在跨洋飞行等应用场景.该结构比较简单,拓扑生成、路由协议等也比较容易,但是平面结构最大的缺点是网络规模受到限制.

### (2) 分层网络结构

分层网络结构由高速通信的能够长滞空节点组成骨干网和低速通信节点组成接入网两个部分组成,其中,高速通信节点可以由预警机、大型飞机或无人侦察机等能长时间滞空的平台组成,低速通信节点可以由小型无人机、战斗机或直升机等平台组成.图 2 给出了机载网络体系结构一般形式的描述.

机载骨干网络在两个或者多个高速通信节点之间建立起较稳定的链路,通过定向天线,提供高带宽、低时延的一体化传输网络.骨干网为低速通信节点提供了可满足如语音、雷达/红外图像和视频等大容量实时数据的高带宽、低延时通信保障和路由功能,同时也提供与卫星网络和地面网络等平台的接入功能.机载接入网络是由低速通信节点形成的分群自组织网络,通过全向天线,提供低带宽、大时延的一体化传输网络.使用这种分层结构网络,网络规模不再受到限制,可扩充性也获得了提升.

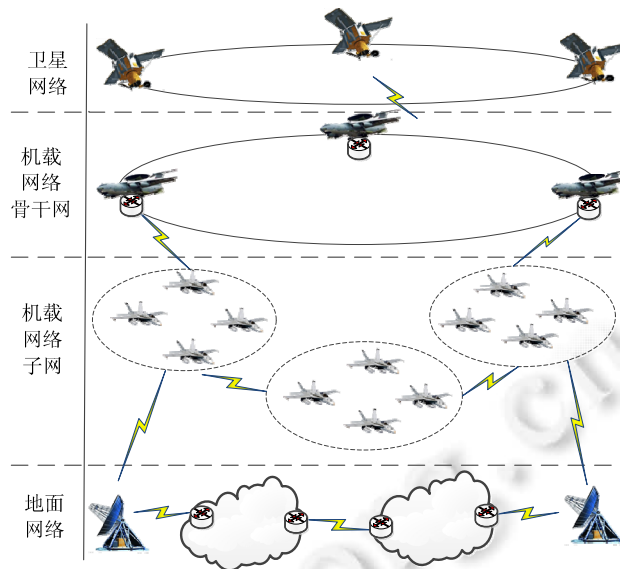


Fig.2 Architecture of airborne network

图2 机载网络的体系结构

#### 1.4 小结

综上所述,机载网络节点组成、通信链路和组网结构具有多样性.在节点组成方面,主要包括了高速通信节点和低速通信节点两类,并且飞机节点装载天线类型既可以有全向天线,也可以有定向天线.在通信链路方面,短波通信与卫星通信都可以用于远程航空通信,当卫星链路被干扰、窃听或损毁的时候,可以通过机载网络的短波通信系统作为应急互补的远程通信系统,提供全时段、全空域以及全电磁环境的空中通信系统.在组网结构方面,由于不同的体系结构针对不同的应用背景,很难对它们进行优劣区分.

为了描述机载网络平面结构和分层结构的特点,本文从网络规模、网络容量、管理开销、拓扑生成、拓扑变化、节点关系、路由协议等方面对机载网络的两种类型的网络体系结构进行了对比,见表1.

Table 1 Comparison of architecture for airborne network

表1 机载网络体系结构对比

体系结构	网络规模	网络容量	管理开销	拓扑生成	拓扑变化	节点关系	路由协议	网络安全	可扩展性
平面结构	小规模	低	低	简单	频繁	对等	平面路由	差	差
分层结构	大规模	高	高	复杂	稳定	不对等	分层路由	强	强

## 2 机载网络特征

机载网络作为一种新型的无线移动自组织网络,不仅具有无线移动自组织网络所固有的特征,如无中心、多跳、自组织、带宽有限等,而且也具有自身的独特性.机载网络的内涵特征主要包括以下几个层面<sup>[3,21-25]</sup>.

### 2.1 节点级特征

- (1) 移动速度快.目前,先进的战斗机、无人侦察机,其飞行速度可达到3~4马赫,未来使用下一代超音速燃烧冲压发动机的飞行器将可以6~10马赫的速度飞行<sup>[26]</sup>,但飞机节点的高速移动也会带来多普勒频移效应;
- (2) 高度差异大.不同飞机节点的飞行高度存在差异性,既可以低空飞行,也可以中高空飞行;
- (3) 移动轨迹可预测.飞机节点通常按照预先设置的运动轨迹飞行,具有一定的规律性.依照某一时刻飞机的行驶方向和速度,可以准确预测出下一时刻飞机的位置;

- (4) 传输范围.飞机节点一般支持超视距通信,且传输距离远近取决于节点高度、调制、编码速率以及传输功率等因素,最远传输距离可超过 500km;
- (5) 节点定位能力.飞机节点可通过 GPS、北斗等全球卫星导航以及辅助设备系统实现对自身位置的定位,获得经度、纬度、高度和速度等信息;
- (6) 能量、存储空间以及计算能力较强.中大型飞机节点的机载通信设备不受电源和存储空间的影响,因为飞机可以通过发动机对通信设备持续供电,飞机承载空间不仅可以保证多种类型天线的尺寸,并装备其他额外的辅助设备,同时还可以提供较强的计算以及存储能力.

## 2.2 链路级特征

- (1) 链路质量不稳定.无线链路容易受到大气中的各种自然现象(如雨、雪、雾、闪电等)、路径衰减、多径效应严重或者敌对方的无线电干扰等因素的影响.对于长距离方向性的链路,机体的阻碍和不正确的指向是造成链路中断的主要原因<sup>[27]</sup>.由于链路容易被干扰,因此,机载链路呈现出间歇性非对称信道、随机中断、高误码率等;
- (2) 存在单向通信链路.受飞机节点发射功率大小各不相同以及传输距离差异性等因素的影响,可能产生单向通信链路,因此会给路由协议带来认知单向性、路由单向性和汇点不可达的问题;
- (3) 低传输速率及受限带宽.因为有限的频谱资源、链路质量不稳定以及节点通信能力差异性显著,所以机载网络的传输速率及带宽都受到限制.

## 2.3 网络级特征

- (1) 大尺度分布场景.飞机节点稀疏分布在大尺度三维空域场景中,邻近飞机之间的距离可以从几米到数百公里不等,从而导致传播时延变化差异较大,并且节点稀疏分布也会带来机载网络连通性问题;
- (2) 分群结构.由于执行特殊任务的需要,机载网络中节点运动通常具有群组的特点,采用分群结构可以实现最有效的控制和最方便的管理;
- (3) 网络拓扑高动态性.由于链路易干扰,从而导致网络拓扑变化快、不可预测性等.高速移动的飞机节点由于具有传输距离远和轨迹具有可预测性等特征,未必是导致网络拓扑变化及不可预测性的主要因素;
- (4) 时延受约束.机载网络数据传输对时延较为敏感,特别是对于实时性要求高的应用程序,如军事监控、应急救援、目标监控和跟踪以及空中交通管理等;
- (5) 生存时间短.机载网络一般是面向特殊任务而临时性构建的,任务完成后,机载网络环境也会自动消失,其生存时间相对于固定网络而言较为短暂;
- (6) 异构性显著.在机载环境下,为满足操作的需求,多种无线系统有效地组合是需要的.不同的无线系统在与同种无线系统进行交互时性能良好,但是异构无线系统间交互性却很差.主要原因是<sup>[27,28]</sup>:① 缺乏互操作性,无线设备商经常在自己的产品上绑定自己私有的路由器,这些路由器使用定制的路由协议,而且其他路由器只能知道其很少的消息,这就增加了异构的无线系统之间交互的困难;② 缺乏通用的软件接口,许多无线系统需要使用专用的管理系统来访问控制;③ 缺乏标准化的链路信息.

## 2.4 小结

综上所述,机载网络与无线移动网络(如无线传感器网络、车载网络)有着不同的网络特征,为了更加理解机载网络的网络特征,本文从节点类型、分布密度、传输距离、传输时延、移动速度、移动规则、能量功耗、链路干扰、误码率、拓扑变化和节点能力等网络特征对无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)、车载网络(vehicular network,简称 VANET)和机载网络(airborne network,简称 AN)进行了对比<sup>[3,23]</sup>,见表 2.

机载网络和车载网络的移动速度和拓扑变化相比于无线传感器网络更快,而且能量功耗都不受限制以及移动规则都可预测.不过,车载网络的传输距离和分布密度没有机载网络那么大尺度的三维分布场景,所以在研究机载网络通信协议时,可以更多地借鉴车载网络通信协议,然后在此基础上,针对机载网络特有特征进行改

进.当然,同样也可以参考现存标准网络通信协议设计机制.

**Table 2** Comparison of WSN,VANET and AN

**表 2** WSN,VANET 和 AN 的对比

网络类型	节点类型	分布密度	传输距离	传输时延	移动速度	移动规则	能量功耗	链路干扰	误码率	拓扑变化	节点能力
WSN	传感器	密集	短	低	慢速	随机	受限制	弱	低	慢	弱
VANET	车辆	密集	较短	较低	快速	可预测	无限制	较弱	较低	较快	较强
AN	飞机	稀疏	远	高	高速	可预测	无限制	强	高	快	强

### 3 机载网络通信协议

机载网络自身的特点决定了它不能使用目前已经存在的一些网络通信标准协议,因此,国内外的研究者针对机载网络协议栈的各个层次进行了深入分析,尤其是在 MAC(media access control)协议、路由协议和传输控制协议方面提出了一些解决方案.但是,总的来说,到目前为止,并没有形成被广泛认可的标准.

#### 3.1 影响通信协议设计的主要因素

##### (1) 机载网络特征复杂多变

机载网络具有大尺度稀疏分布场景、节点快速移动、高动态拓扑结构、链路质量不稳定、高误码率、高时延、低速率和带宽受限等不利因素,使得现有网络协议方面的研究成果无法直接应用于这种高动态复杂多变的机载网络通信环境.例如,传输控制协议容易受到机载通信链路的长时延和高误码率等不利因素的影响,导致 TCP 协议无法有效区分网络数据丢包现象是由于传输错误还是由于拥塞造成.另外,大尺度稀疏分布场景和节点高速移动等特点,也导致出现网络连通性问题.这些不利因素也需要在设计机载网络通信协议的时候加以考虑.

##### (2) 机载通信业务 QoS 要求多样化

机载网络通信业务主要包括 4 种类型<sup>[29]</sup>:① 在基于低延迟的视距通信业务的目标监控和跟踪应用环境中,通常要求时延敏感以及较高的可靠性;② 在基于态势信息的通信业务应用环境中,对时延要求为 10ms~100ms,此类通信业务数量非常大,对吞吐量的要求比对可靠性的要求还要高;③ 在基于音频、视频等多媒体通信业务的遥测中继应用环境中,通常要求低抖动性以及高传输带宽,但对可靠性未必有那么严格的要求;④ 在基于非实时的通信业务的互联网服务应用环境中,通常对延迟要求不高,但此类应用会在短时间内占用大量的带宽资源.

##### (3) 物理层通信技术差异性

由于机载网络独特的性质,要求物理层在高速移动的环境下具有很强的健壮性,减少因飞机节点高速移动引起的信号突变和多普勒效应等的影响.尤其是随着物理层的方向天线、正交频分复用(OFDM)和多输入多输出(MIMO)等技术应用的不断深入,为机载网络提供了更高的数据传送率.例如,网络通信协议性能容易受到天线类型的影响<sup>[30]</sup>,定向天线相比于全向天线具有高增益、传输距离远、传输速率快、空间复用度高等优势,可满足高动态机载环境的复杂通信要求.当然,机载网络通信链路也可以采用定向天线与全向天线组成天线阵的方式,充分发挥定向与全向天线的优点,提高无线信号的传输,增加物理层的性能与通信能力.

#### 3.2 MAC 协议

数据链路层的 MAC 协议<sup>[31]</sup>主要为移动节点提供公平和快速的接入机制,保证时效性、可靠性和稳定性的数据传输机制.它的优劣直接影响到极为有限的无线通信资源的使用率,对机载网络的性能起着决定性的作用.目前,机载网络的 MAC 协议一般可分为<sup>[29]</sup>IEEE 802.11 DCF(distributed coordination function)及其改进型、SPMA(statistical priority based media access)及其改进型以及 TDMA(time division multiple access)及其改进型.

##### 3.2.1 IEEE 802.11 DCF 及其改进型

IEEE 802.11 DCF 及其改进型协议是指在节点发送分组数据包之前,采用 RTS/CTS 控制帧握手方式来预约信道时隙,以避免不同节点间分组数据包的碰撞.但该协议通常在物理层采用全向天线的无线收发技术,当 RTS/

CTS 控制帧来回交互时,会带来节点间的相互干扰,导致网络容量受限.

为解决上述问题以及扩大网络通信范围,Alshbatat 等人<sup>[32]</sup>采用定向天线与全向天线组成天线阵的方式,提出了一种基于天线阵方式的 MAC 协议,通过定向天线在数据信道上发送数据信息,而将控制信息(如 RTS,CTS,ACK 等)以全向天线方式在控制信道上发送,充分发挥了定向与全向天线的优势,既减轻了“耳聋”问题,又提高了信道复用率.Cheng 等人<sup>[33]</sup>为了减少传输干扰和冲突问题,也采用了定向天线与全向天线组成天线阵的方式,提出了一个基于自适应定向天线的 MAC 协议.

### 3.2.2 SPMA 及其改进型

SPMA 协议<sup>[16,29]</sup>主要应用于对数据传输时效性和可靠性有严格要求的军事航空通信领域.SPMA 协议主要针对 CSMA 协议在发送报文之前通常只是依据信道是否空闲的单一指标,以及不同优先级业务在信道分配等待过程中的时延问题,利用异步跳频机制和多队列模型,实现了基于信道忙闲程度和区分业务优先级的多信道接入算法.SPMA 协议为了满足 TTNT 网络要求将端到端时延控制在 2ms 内的目标,提出了基于负载反馈的传输机制和退避窗口实时更新可变因子的退避算法.

针对采用 SPMA 协议的机载网络中,随着机载通信业务量的不断增加,不同移动节点的突发性发生碰撞的概率也随之增大,以至于影响了吞吐量、分组成功传输概率等网络性能.Wang 等人<sup>[29]</sup>提出了一种基于 Turbo 编码、猝发技术、异步跳频和优先级区分的媒体接入控制协议 PFH\_MAC,该协议首先采用为高、低两种优先级分组提供不同的排队策略和接入网络权限,以便更好地提供差分服务能力;其次,借鉴 SPMA 协议的多用户同时通信的思想,Wang 等人运用 Markov 建模、排队理论、组合理论和离散 Laplace 变换方法构建模型,研究了 PFH\_MAC 协议的各项性能;最后,仿真结果也验证了理论推导的准确性以及差分服务机制的有效性.

### 3.2.3 TDMA 及其改进型

TDMA 及其改进型 MAC 协议<sup>[34,35]</sup>是一种作为多址接入的调度类 MAC 协议,其核心问题在于如何有效地应用在机载网络环境中.首先要解决时隙调度分配算法中移动节点之间是如何协调时钟同步机制这一关键问题,由于移动节点通常具有位置定位与导航服务能力,因此,TDMA 及其改进型协议能够快速、有效地为节点之间信道访问提供同步的全球时间参考;其次,需要解决机载网络中移动节点高速移动性所带来的通信链路频繁失效性问题,考虑到移动节点运动轨迹一般具有规律性,因此可通过对网络拓扑进行有效预测,从而有效预防解决机载通信链路失效性问题;最后,要解决机载网络的抗干扰性差的问题,由于 TDMA 及其改进型协议本身具有较高的低截获性和抗干扰性,所以可以有效地解决机载网络抗干扰性问题.

### 3.2.4 小结

综上所述,IEEE 802.11 DCF 及其改进型协议主要适用于低空领域由小型无人机等移动节点组成的机载网络应用场景.由于 IEEE 802.11 DCF 协议是为支持分组突发业务而设计的,它不支持对传输时延要求严格的实时业务应用场景.SPMA 协议及其改进型主要适用于军事航空通信中对传输时延与可靠性要求严格的应用场景,但存在网络容量受限等问题.TDMA 及其改进型主要适用于对时延要求较严格以及网络容量需求较大的机载网络应用场景.

## 3.3 路由协议

机载网络路由协议要求在链路变化、带宽受限等情况下,能够实现快速收敛的路由生成与路由选择策略,保持链路畅通,并提供与地面网络和卫星网络的兼容和互联.目前,研究者针对路由协议的研究可粗略地分为两类:① 改进型的路由协议;② 专门为机载网络环境以及特殊应用所设计的新型网络路由协议.

### 3.3.1 改进型的路由协议

改进型的路由协议主要针对现有网络路由协议直接应用于机载网络中存在的问题,相继提出了一系列解决方案.但是,大部分解决方案没有从全局的角度考虑和把握路由机制,仅仅是为了解决网络中特殊的问题.

针对 OSPF 无法满足于机载网络的超视距通信问题,Kiwior 等人<sup>[36]</sup>通过仿真平台修改默认定时器间隔(如 Cisco 缺省设置 Hello Interval 为 10s,Dead Interval 为 40s,SPF Delay 为 5s 等).实验结果表明:通过配置提供更快的收敛性,虽然可以减少 80% 的流量损失,但平均数据包延迟和平均分组抖动并不显著.但仿真实验只是简单模

拟少量移动节点之间的路由。

Idhaw 等人<sup>[37]</sup>进一步评估了 OSPF 协议应用于复杂多变机载通信环境的可行性。

Cheng 等人<sup>[38]</sup>采用路由开销、端到端时延和分组交付率等性能指标评估了 OSPF-MDR,OLSR 和 AODV 路由协议应用于低速率复杂多变机载通信环境的可行性。实验结果表明:随着移动速度的逐渐提高,分组交付成功率下降得较为明显,即使在正常的巡航速度,表现最好的主动路由协议 OLSR 和 OSPF-MDR 分组交付成功率也只有 83%~88%之间,在更高的速度情况下降至 57%~77%。丢包的主要原因是无线链路出现中断现象,仿真实验存在的问题是:路由协议评估是基于支持短距离通信的 802.11WLAN 的 MAC 协议,现实情况下,移动节点时稀疏分布在大尺度空域中,通信距离最远超过 500km 以上。Kuperman 等人<sup>[39]</sup>通过路由收敛时间、路由开销和分组交付率等性能指标评估了主动路由协议 OLSR 和 OSPF-MDR 应用于大规模机载网络的可行性。实验结果表明:OSPF-MDR 的分组交付率和路由开销高于 OLSR,路由收敛性不如 OLSR 稳定。实验结论:OSPF-MDR 更适用于大规模机载网络,但是必须要解决网络收敛性问题。Kim 等人<sup>[40]</sup>采用路由开销、分组交付率和路由开销性能指标评估了 AODV,DSDV 和 GPSR 路由协议适用于机载网络可行性。实验结果表明,GPSR 综合性能指标高于 AODV 和 DSDV。

在现实机载网络实验环境中,Cheng 等人<sup>[27,28]</sup>采用异构无线技术与评估了机载多跳主干网络链路可用性、链路数据率和延迟、端到端网络可用性以及 OSPF 路由协议等网络性能,该实验通过选择两个陆地基点和两个空中基点共同构建了机载网络性能验证实验平台(如图 3(a)所示)。为了提高网络链路稳定性,实验中每个基点均使用了多种异构无线系统(ESB 和 ORS 等)。在此实验平台的基础上,Cheng 等人测试与评估了 OSPF 路由协议在空-空路由和地-空-地路由进行路径遍历所占的百分比。由于 OSPF 的链路代价是根据各种链路指标计算的(例如链路数据率和链路延迟),因此路由会有很大的变化。图 3(b)显示了 OSPF 代价变化的一个例子。该例中,地-空-空-地(FortDix-R2-R1-SAIL)路由的代价为 43,而地-空-地(FortDix-R2-SAIL)路由的代价为 42。因此,路由器会选择地-空-地的路径。通过 4 天的实验,总结发现:在 FortDix 到 SAIL 的数据传输中,空-空的链路(R1-R2)有大约一半的时间是被使用的。实验结果表明:OSPF 路由协议在异构无线系统组合的工作模式中,可较大幅度地改善机载通信链路的性能。

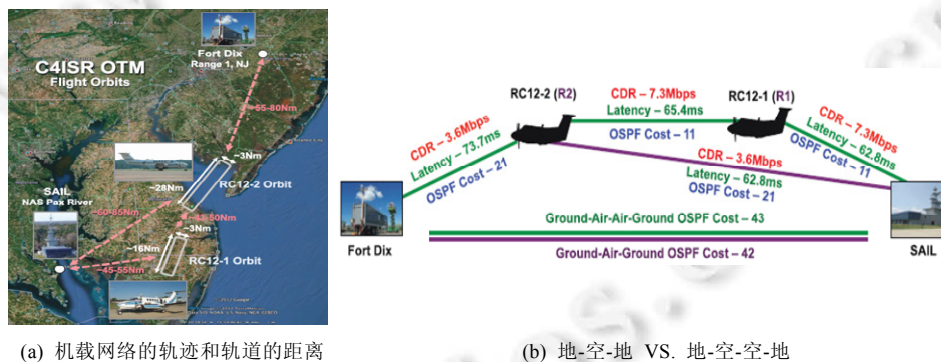


Fig.3 Validation experiments of airborne network

图 3 机载网络验证实验

### 3.3.2 新型的路由协议

目前,研究者针对机载网络环境设计的新型路由协议粗略可分为 4 类:① 针对机载网络节点高速移动等特点,提出了基于多普勒频移量的新型路由协议;② 针对 GPS、北斗、地面空管基站和 ADS-B(automatic dependent surveillance-broadcast)等定位辅助技术,提出了基于地理位置的新型路由协议;③ 针对机载网络分群结构等特点,提出了基于分层的路由协议;④ 针对移动节点之间极少存在端到端连通路径等情况,提出了基于 DTN(delay/disruption tolerant network)的路由协议。



### (1) 基于多普勒频移量的路由协议

针对机载网络复杂多变的通信环境中移动节点高速移动等因素导致通信链路不稳定的问题,Sakhaee 等人<sup>[2]</sup>依据移动节点高速移动会带来多普勒频移效应的原理,首次提出了一种基于多普勒频移量的路由协议 MUDOR(multipath Doppler routing),采用多普勒频移量(综合考虑了移动节点间相对速度和相对位置等因素影响)作为尺度进行路由转发,获得稳定的下一跳节点,从而保证了通信链路稳定性.针对 MUDOR 路由协议无法保证网络的通信质量问题,Sakhaee 等人<sup>[41]</sup>进一步将 MUDOR 扩展为面向通信服务质量的多普勒频移量路由协议 QoS-MUDOR(QoS multipath Doppler routing),采用多普勒频移量和 QoS(节点和链路性能指标)的加权值作为联合尺度进行路由,运用转发最优化请求策略解决了路由机制中的泛洪问题,保证了通信链路稳定性和网络的通信质量.

为解决机载网络中移动节点在低空空域内通信链路无法满足实时通信服务的问题,Gu 等人<sup>[42]</sup>提出了一种基于时延感知的多普勒频移量路由协议 DASR(delay-aware stable routing),采用多普勒频移量和节点预期排队时延作为联合尺度进行路由转发,能够有效地减少网络中的局部拥塞,提高了网络的吞吐量以及减小端到端时延,从而满足低空空域内航空通信业务的实时性要求.但其路由由区域为局部区域,并不能从全局角度实现流量平衡的目的.Lei 等人<sup>[43]</sup>引入跨层协议设计的思想,提出了一个基于链接可用性评估的多普勒频移量路由协议 LEBR(link availability estimation based routing),采用链路状态信息作为度量尺度,通过扩展按需路由 AODV 协议,较好地解决了机载网络通信链路质量不稳定和频繁通断等问题.

### (2) 基于地理位置的路由协议

基于地理位置路由协议仅需要依照节点地理位置信息进行路由选择,并不需要路由表或者存储路径,每个节点仅需要获知邻居节点和目的节点的位置信息,决定它自己的下一条节点.由于机载网络移动节点高速移动,引起所获知邻居节点和目的节点的位置信息发生偏差或者错误,从而导致数据包分组交付率等性能指标急剧下降.近年来,研究者主要从以下两个方面开展了研究工作.

#### ① 通过引入新的节点定位技术提高对目的节点或者邻居节点位置的精确度.

Hyeon 等人<sup>[44]</sup>通过引入地面空管基站辅助节点定位技术,提出了一种地理路由协议 GRAA(geographic routing protocol for aircraft ad hoc network),提高了对目的节点或者邻居节点位置的精确度.Zhou 等人<sup>[45]</sup>使用机载广播式自动相关监视 ADS-B 系统进行辅助节点定位,提出了一种地理路由协议 A-R.作为传统机载雷达系统的演进,ADS-B 系统可以提供更加丰富、准确的飞行信息.通过对机载 ADS-B 系统的组成机制进行分析,将其整合到机载路由系统中.由此,可以直接使用机载 ADS-B 系统所提供的位置信息,建立节点的邻居表,达到简化路由广播机制的目的.当节点数量增多后,可以有效地减少路由开销,提高整个网络的资源利用率.另一方面,将 ADS-B 系统所提供的节点速度信息作为选路指标,参与下一跳的选择.该协议可以更好地支持飞机的高速移动性,可满足网络拓扑的快速变化.

#### ② 综合考虑节点位置信息、节点速度、运动方向以及恶劣天气等因素.

Jabbar 等人<sup>[46]</sup>借鉴跨层协议设计思想和综合考虑地理位置信息、速度、运动方向等因素,提出了一种地理路由协议 AeroRP(aeronautical routing protocol).该协议以 TTL 值作为度量尺度进行路由,向估计最快到达目的节点通信范围的邻居节点转发数据包,提高了分组交付率等性能指标.

### (3) 基于分层的路由协议

针对平面路由协议受限于机载网络规模的问题,Lee 等人<sup>[47]</sup>开展了基于分层的路由协议的研究工作.该协议通常将移动节点分级为簇首节点、普通节点以及网关节点.在簇内,普通节点只能与簇首节点进行通信,而簇与簇之间是通过网关节点进行通信的.在深入研究低空空域内飞机节点的群组移动规律的基础上,Gu 等人<sup>[48]</sup>提出了一种基于动态分簇算法的混合路由协议 CBHR(cluster based hybrid routing protocol).该协议整合了 OLSR 和 AODV 路由协议,利用飞机的移动状态信息(相对速度和相对加速度等)和节点度数作为联合代价尺度以及基于节点度的动态分簇算法.簇内每个簇头节点采用主动路由协议 OLSR 维护所有簇成员的链路状态,簇间数据包的传输中则采用被动路由协议 AODV,实现有效地控制通信开销以及提高整个网络资源利用率的目的.

#### (4) 基于 DTN 的路由协议

基于多普勒频移量的路由协议、基于地理位置的路由协议以及基于分层的路由协议仍然遵循“机载网络存在完整的端到端路径”的假设,然而在机载网络通信链路频繁中断以及节点高速移动等情况下,节点之间将极少存在端到端连通路,此时要求机载网络全连通的先路由-后传输的路由模式无法正常、有效地进行路由的生成和选择.为此,研究者<sup>[49-51]</sup>引入容延容断网络 DTN 的“存储-携带-转发”或“存储-等待-转发”不要求网络全连通的存储路由模式<sup>[52]</sup>,相继提出了一些基于 DTN 的路由协议(如 TAFRA<sup>[50]</sup>).

#### 3.3.3 小结

为了进一步描述机载网络不同路由协议的特点,我们从路由类型、路由发现、路由选择度量尺度、路由存储、链路稳定性、转发策略、是否支持部分路径、是否支持 QoS 和跨层协议设计等方面对机载网络的主要路由协议进行了分析与比较,见表 3.

**Table 3** Comparison of routing protocol for airborne network

表 3 机载网络路由协议对比

路由协议	路由类型	路由发现	路由选择度量尺度	路由存储	链路稳定性	转发策略	部分路径	支持 QoS	跨层设计	验证平台
OSPF <sup>[27]</sup>	改进路由	周期性主动	距离矢量	需要	差	存储转发	不支持	否	否	真实环境
MUDOR <sup>[2]</sup>	多普勒频移量的路由	按需	多普勒频移量	需要	好	存储转发	不支持	否	否	模拟环境
QoS MUDOR <sup>[41]</sup>	多普勒频移量的路由	按需	多普勒频移量/QoS 值	需要	好	存储转发	不支持	是	否	模拟环境
DASR <sup>[42]</sup>	多普勒频移量的路由	按需	多普勒频移/节点排队时延	需要	好	存储转发	不支持	否	否	模拟环境
LEBR <sup>[43]</sup>	多普勒频移量的路由	按需	链路可用性	需要	好	存储转发	不支持	否	是	模拟环境
GRAA <sup>[44]</sup>	地理位置路由	周期性主动	位置信息	不需要	好	周边转发	支持	否	否	模拟环境
A-R <sup>[45]</sup>	地理位置路由	周期性主动	欧式距离/相对速度	不需要	好	周边转发	支持	否	否	模拟环境
AeroRP <sup>[46]</sup>	地理位置路由	周期性主动	位置信息	不需要	好	周边转发	支持	是	是	模拟环境
CBHR <sup>[48]</sup>	分层路由	周期性主动	移动状态信息/节点度数	需要	好	周边转发	支持	否	否	模拟环境
TAFRA <sup>[50]</sup>	DTN 路由	不更新	TTL 值/距离	不需要	差	携带转发	支持	否	否	模拟环境

### 3.4 传输控制协议

#### 3.4.1 设计目标和要素

机载网络具有特殊的网络特征及应用背景,因此,传输控制协议的设计更具有挑战性和独特性<sup>[3,53]</sup>.为了实现高效、可靠的端到端数据传输服务质量的设计目标,传输控制协议必须提供以下几个主要功能<sup>[13]</sup>.

##### (1) 流量控制

标准 TCP 协议主要采用滑动窗口机制来实现流量控制.由于机载网络特殊的网络特征(如节点高速移动、不对称带宽等)导致信源至目的地之间的信道可能与目的地返回信源的信道不一致或者两个信道带宽不相同,因此,传输层无法确定准确的发送速率,从而滑动窗口机制出现失效问题.为此,新型机载网络传输控制协议应

采用速率控制机制、混合式(窗口+速率)控制机制等方式来实现流量控制.

#### (2) 拥塞控制

标准拥塞控制是假设分组数据包丢失都是由网络拥塞造成的,而把其他导致丢包的原因忽略不计.因为机载网络高误码率、链路频繁中断、高时延等非拥塞丢包现象所占比率不可能忽略不计,使得标准拥塞控制机制无法正确判断机载网络数据丢包现象是由于拥塞丢包还是由于非拥塞丢包所致,所以,基于丢包作为拥塞反馈信号的拥塞控制协议无法直接应用到机载网络中.而将时延作为拥塞反馈信号的拥塞控制机制虽然克服了基于丢包的拥塞控制机制的缺陷,不过,当出现机载网络通信路径本身延时变化不规律、路由重计算效应等非拥塞时延问题的时候,也会出现误判现象.因此,机载网络拥塞控制需要更加有效的分组丢失反馈、延时反馈、混合反馈等反馈机制.

#### (3) 重传机制

标准重传机制是保证传输控制高效性和可靠性的重要保障,主要包括超时重传和快速重传等.在机载网络中,非拥塞丢包现象频繁发生,因此,基于3次ACK确认的快速重传机制无法直接应用到机载网络中.同理,在机载网络中,由于非拥塞时延现象也频繁发生,其中,RTO(retransmission time out)的值被设置得过大、过小都会对传输控制协议造成不利影响,因此,研究自适应RTO超时重传机制,是保证可靠性和高效性的关键技术之一.另外,中间节点的缓存机制可以进一步增强重传机制的高效性和可靠性,使接收端未收到的数据报不必由发送端直接重传.

### 3.4.2 传输控制协议设计

目前,关于机载网络传输控制协议设计的研究成果较少,可粗略地分为两类:①基于TCP改进的传输控制协议;②专门为机载网络环境以及特殊应用所设计的新型传输控制协议.

基于TCP改进的传输控制协议<sup>[54]</sup>一方面在一定程度上适应了机载网络链路环境;另一方面与TCP相兼容,能够方便地接入Internet,因此可以较快地应用到商业中去.然而,全新的传输协议则不具备与TCP兼容的能力,必须通过特定的网关转换才能连接到有线网络.Rohrer等人<sup>[46,55]</sup>基于拆分TCP类的思想和跨层设计机制,提出了一种运用于遥测网络系统(TmNS)和测试对象(TA)之间的数据传输协议AeroTP,设计了全新的报文段的首部格式.同时,通过增设网关实现TCP/IP互操作,实现了高效与可靠的数据传输.

### 3.4.3 小结

综上所述,在复杂多变的机载网络环境及特殊应用背景下,为实现高效与可靠的数据传输控制的设计目标,机载网络传输控制协议必须提供流量控制、拥塞控制和重传机制等主要功能.现有的机载网络传输控制协议还存在诸多弊端,因此,研究提供可持续高性能传输服务质量要求的新型传输控制机制具有重要的意义和学术价值.

## 4 未来研究方向

虽然机载网络体系结构与协议栈研究已经引起较多的关注,现有的研究工作也取得了一定成果,但从实际应用来说,还有诸多亟待解决的问题值得研究<sup>[3,23,24]</sup>,主要包括新颖网络体系结构设计、网络测量与建模分析、移动模型研究、路由机制研究、传输控制机制研究、跨层协议设计和网络管理等.

#### (1) 新颖网络体系结构设计

当前,设计的机载网络体系结构大都借鉴了地面移动自组织网络的设计理念.事实上,机载网络的任务需求、工作环境和运行机制都与地面移动自组织网络存在显著差别.为此,如何依照机载网络应用的包括应急救援、遥感数据测控、跨洋飞行以及协同作战等不同场景,综合考虑应用特点和网络特征,设计新颖的机载网络体系架构,提高网络的鲁棒性、可靠性和服务能力,是需要解决的关键问题.Xiao等人<sup>[56]</sup>已经开展了利用云计算提出机载云的新型网络体系结构方面的研究.

#### (2) 网络测量与建模分析

网络测量与建模分析是理解机载网络发展和演化过程的基础.网络测量可以通过机载网络的外在表现揭

示其内在机理;而建模分析则可以帮助研究者构建具体系统无关的、便于理论研究的开展,进而给机载网络设计提供指导.当前,对于机载网络的特征分析大都以定性分析的方式给出,缺乏定量的测量分析.因此,如何开发高效的测量分析方法,从而得到有用的分析结论,进而建立机载网络模型,是需要下一步重点研究的基础问题.Cheng 等人<sup>[27,28]</sup>已经开展了关于链路可用性分析、链路数据率、链路延迟、端到端网络可用性、端到端网络 RTT 等在低负载机载网络测量方法方面的研究.

### (3) 移动模型研究

移动模型描述了移动节点的移动模式,包括位置、速度、加速度、方向等特征的变化,广泛应用于机载网络协议性能的分析与评价,是机载网络的关键技术之一.目前,研究符合实际飞机宏观和微观移动特征的移动模型主要有三维平滑随机移动模型<sup>[57]</sup>和三维高斯-马尔可夫移动模型<sup>[58]</sup>等,但现存的移动模型假设条件过于理想化和简单化.

### (4) 路由机制研究

在路由机制研究方面主要包括:① 路由协议应具有安全机制,由于机载网络的固有特性,其路由协议极易受到安全威胁,尤其是在军事应用中,现有的路由协议很少考虑安全问题,因此在一些应用中,必须考虑设计具有安全机制的路由协议;② 机载网络生存的空间环境复杂多变,但目前大部分机载网络路由协议很少考虑路由的可生存性问题,导致机载网络的可生存性面临较大的挑战<sup>[14]</sup>.

### (5) 传输控制机制研究

在传输控制机制研究方面主要包括:① 针对机载网络移动节点高速移动、链路频繁中断等问题,利用 UDP 传输机制与拥塞感知等原理,研究基于 UDP 的机载网络传输控制协议;② 针对机载网络应用业务 QoS 要求日益多样化的问题,研究业务 QoS 区分的传输控制协议;③ 多路径传输控制机制研究<sup>[59]</sup>;④ 基于网络编码的机载网络传输控制机制研究.

### (6) 跨层协议设计

在跨层协议设计方面<sup>[60]</sup>,针对严格分层设计模型不利于提高资源利用率等问题,通过对机载网络跨层协议设计的研究,有助于加速上层对物理层、链路层或者外部环境改变的快速响应.比如在研究跨层路由协议时,可利用数据链路层的链路稳定性、出错率、可用带宽等信息作为路由选择度量尺度,从而提高网络资源利用率、流量负载以及能够以全局的方式适应网络状况的变化和应用的需求.

### (7) 网络管理

机载网络管理通常涵盖网络资源规划、配置管理、故障诊断与恢复、性能检测和分析优化等功能,它是发挥机载网络基本效能、提高资源利用效率的根本途径.目前,机载网络管理的研究成果较少,该领域还处于研究与探索阶段,可发挥的空间很大,可研究的内容很广泛,主要包括:① 面向复杂通信环境网络的快速故障诊断与定位机制研究;② 面向网络资源受限动态异构网络的自动规划与性能分析;③ 面向空间立体网络的运行综合分析 with 三维动态可视化呈现.

## 5 结 论

机载网络作为连接卫星网络和地面网络的空中通信的重要枢纽,将推动天空地一体化网络的无缝融合,承担更加丰富的通信服务.在本文中,我们归纳和总结了已有的研究,着重讨论了网络体系结构和协议栈等与网络密切相关的技术问题,并对一些可能的研究方向进行了简要的阐述,期望能借此推动国内相关领域学者对这一新兴领域的关注与研究.

**致谢** 感谢解放军理工大学王睿、张国敏和魏祥麟老师详细和中肯的修改建议;感谢匿名审稿人提出的宝贵意见,为本文的完善、提高起到重要的作用;感谢实验室其他同学在写作过程中给予的无私帮助和支持.

**References:**

- [1] Kwak K, Sagduyu Y, Yackoski J, Azimi-Sadjadi B, Namazi A, Deng J, Li J. Airborne network evaluation: Challenges and high fidelity emulation solution. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(10):30–36. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6917398]
- [2] Sakhaee E, Jamalipour A, Kato N. Aeronautical ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. Las Vegas: IEEE, 2006. 246–251. [doi: 10.1109/WCNC.2006.1683472]
- [3] Bekmezci I, Sahingoz OK, Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 2013,11(3):1254–1270. [doi: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004]
- [4] Maza I, Caballero F, Capitán J, Dios JR, Ollero A. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2011,61(1-4):563–585. [doi: 10.1007/s10846-010-9497-5]
- [5] Zaouche L, Natalizio E, Bouabdallah A. ETAF: Efficient target tracking and filming with a flying ad hoc network. In: *Proc. of the 1st Int'l Workshop on Experiences with the Design and Implementation of Smart Objects*. New York: ACM Press, 2015. 49–54. [doi: 10.1145/2797044.2797055]
- [6] Schnell M, Epple U, Shutin D, Schneckenburger N. LDACS: Future aeronautical communications for air-traffic management. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(5):104–110. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6815900]
- [7] Barrado C, Messeguer R, López J, Pastor E, Santamaria E, Royo P. Wildfire monitoring using a mixed air-ground mobile network. *IEEE Trans. on Pervasive Computing*, 2010,9(4):24–32. [doi: 10.1109/MPRV.2010.54]
- [8] Cho A, Kim J, Lee S, Kee C. Wind estimation and airspeed calibration using a UAV with a single-antenna GPS receiver and pitot tube. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2011,47(1):109–117. [doi: 10.1109/TAES.2011.5705663]
- [9] Yanmaz E, Kuschnig R, Bettstetter C. Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. Turin: IEEE, 2013. 120–124. [doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6566747]
- [10] Abdulla AE, Md Fadlullah Z, Nishiyama H, Kato N, Ono F, Miura R. An optimal data collection technique for improved utility in UAS-aided networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. Toronto: IEEE, 2014. 736–744. [doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848000]
- [11] Ben-Asher Y, Feldman S, Gurfil P, Feldman M. Distributed decision and control for cooperative UAVs using ad hoc communication. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2008,16(3):511–516. [doi: 10.1109/TCST.2007.906314]
- [12] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [13] Chen LJ, Jiang H, Wu J, Guo CC, Xu WP, Yan PL. Research on transmission control on vehicle ad-hoc network. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(6):1477–1490 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org/1000-9825/18/1477.htm>
- [14] Lu Y, Zhao YJ, Sun FC, Li HB, Ni GQ, Wang DJ. Routing techniques on satellite networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(5):1085–1100 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org/1000-9825/4581.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004581]
- [15] Mario G, Kaixin X. Minuteman: Forward projection of unmanned agents using the airborne Internet. In: *Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Big Sky*: IEEE Press, 2002. 2715–2725. [doi: 10.1109/AERO.2002.1036112]
- [16] Rockwell C. The TTNT project. 2001. [https://www.rockwellcollins.com/Data/Products/Communications\\_and\\_Networks/Networks/Tactical\\_Tar\\_geting\\_Network\\_Technology.aspx](https://www.rockwellcollins.com/Data/Products/Communications_and_Networks/Networks/Tactical_Tar_geting_Network_Technology.aspx)
- [17] Herder JC, Stevens JA. Method and architecture for TTNT symbol rate scaling modes. *Int'l CI: H04J3/22 US Pat 7 839 900 B1*. 2010.
- [18] Sakhaee E, Jamalipour A. The global in-flight Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006,24(9):1748–1757. [doi: 10.1109/JSAC.2006.875122]
- [19] Amirfeiz M. The ATENAA project. 2006. [http://cordis.europa.eu/result/rcn/47576\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/47576_en.html)
- [20] Schnell M, Scalise S. Newsy-Concept for networking the sky for civil aeronautical communications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007,22(5):25–29. [doi: 10.1109/MAES.2007.365331]
- [21] Kou MY, Zhao R. *Modern Aeronautical Communications Technology*. Beijing: National Defense Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [22] Ceng HY, Tian YC. *Tactical Wireless Communications and Networks-Design Concepts and Challenges*. Beijing: National Defense Industry Press, 2014 (in Chinese).

- [23] Cheng BN, Block FJ, Hamilton BR, Ripplinger D, Timmerman C, Veytser L, Narula-Tam A. Design considerations for next-generation airborne tactical networks. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(5):138–145. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6815904]
- [24] Sahingoz OK. Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014,74(1-2):513–527. [doi: 10.1007/s10846-013-9959-7]
- [25] Zheng B, Zhang HY, Huang GC, Ren QH. Status and development of aeronautical ad hoc networks. *Telecommunications Science*, 2011,27(5):38–47 (in Chinese with English abstract).
- [26] Wu WQ, Zheng S, Zhang QY. Research on high dynamic high altitude platforms network oriented routing protocol. *Journal on Communications*, 2012,1:022 (in Chinese with English abstract).
- [27] Cheng BN, Charland R, Christensen P, Veytser L, Wheeler J. Evaluation of a multihop airborne IP backbone with heterogeneous radio technologies. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2014,13(2):299–310. [doi: 10.1109/TMC.2012.250]
- [28] Cheng BN, Coyle A, Mc Garry S, Pedan I, Veytser L, Wheeler J. Characterizing routing with radio-to-router information in a heterogeneous airborne network. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2013,12(8):4183–4195. [doi: 10.1109/TWC.2013.052613.130019]
- [29] Bazan O, Muhammad J. A survey on MAC protocols for wireless ad hoc networks with beam forming antennas. *IEEE on Communications Surveys & Tutorials*, 2012,14(2):216–239. [doi: 10.1109/SURV.2011.041311.00099]
- [30] Temel S, Bekmezci I. LODMAC: Location oriented directional MAC protocol for FANETs. *Computer Networks*, 2015,83:76–85. [doi: 10.1016/j.comnet.2015.03.001]
- [31] Wang YQ, Yang F, Huang GC, Zhang HY, Guo JX. Media access control protocol with differential service in aeronautical frequency-hopping ad hoc networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2013,24(9):2214–2225 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4335.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04335]
- [32] Alshbatat AI, Dong L. Adaptive MAC protocol for UAV communication networks using directional antennas. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2010. 598–603. [doi: 10.1109/ICNSC.2010.5461589]
- [33] Bin C, Linlin C, Minghua Y, Guo T, Tian C. DA-MAC: A duty-cycled, directional adaptive MAC protocol for airborne mobile sensor network. In: *Proc. of the IEEE Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*. 2013. 389–392. [doi: 10.1109/ICDMA.2013.91]
- [34] Li J, Gong E, Sun Z, Li L, Xie H. An interference-based distributed TDMA scheduling algorithm for aeronautical ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC)*. 2013. 453–460. [doi: 10.1109/CyberC.2013.84]
- [35] Jang H, Kim E, Lee JJ, Lim J. Location-Based TDMA MAC for reliable aeronautical communications. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2012,48(2):1848–1854. [doi: 10.1109/TAES.2012.6178108]
- [36] Kiwiior D, Idhaw EG, Pizzi SV. Quality of service (QoS) sensitivity for the OSPF protocol in the airborne networking environment. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM)*. Atlantic City: IEEE, 2005. 2366–2372. [doi: 10.1109/MILCOM.2005.1606022]
- [37] Idhaw E, D'Amelia J, Burdin J, Shaio J. Techniques for enabling dynamic routing on airborne platforms. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM)*. Boston: IEEE, 2009. 1–9. [doi: 10.1109/MILCOM.2009.5379851]
- [38] Cheng BN, Moore S. A comparison of MANET routing protocols on airborne tactical networks. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM)*. 2012. 1–6. [doi: 10.1109/MILCOM.2012.6415798]
- [39] Kuperman G, Veytser L, Cheng BN, Moore S, Narula-Tam A. A comparison of OLSR and OSPF-MDR for large-scale airborne mobile ad-hoc networks. In: *Proc. of the 3rd ACM Workshop on Airborne Networks and Communications*. New York: ACM Press, 2014. 17–22. [doi: 10.1145/2636582.2637347]
- [40] Kim KI. A simulation study for typical routing protocols in aircraft ad hoc networks. *Int'l Journal of Software Engineering & Its Applications*, 2013,7(2):227–234.
- [41] Sakhaee E, Jamalipour A, Kato N. Multipath Doppler routing with QoS support in pseudo-linear highly mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the 6th IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. 2006. 3566–3571. [doi: 10.1109/ICC.2006.255625]

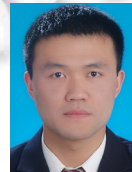
- [42] Gu WZ, Li JL, He FJ, Cai FH, Yang FC. A delay-aware stable routing protocol for aeronautical ad hoc networks. *Journal of Information & Computational Science*, 2012,9(2):347–360.
- [43] Lei L, Wang D, Zhou L, Chen XM, Cai SS. Link availability estimation based reliable routing for aeronautical ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2014,20:53–63. [doi: 10.1016/j.adhoc.2014.03.005]
- [44] Hyeon SU, Kim KI, Yang SW. A new geographic routing protocol for aircraft ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Digital Avionics Systems Conf. (DASC)*. 2010. 2.E.2-1–2.E.2-8. [doi: 10.1109/DASC.2010.5655476]
- [45] Zhou Q, Gu WZ, Li JL, Sun QB, Yang FC. A topology aware routing protocol based ADS-B system for aeronautical ad hoc networks. In: *Proc. of the 8th IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*. Shanghai: IEEE, 2012. 1–4. [doi: 10.1109/WiCOM.2012.6478379]
- [46] Rohrer JP, Jabbar A, Cetinkaya EK, Perrins E, Sterbenz JPG. Highly-Dynamic cross-layered aeronautical network architecture. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2011,47(4):2742–2765. [doi: 10.1109/TAES.2011.6034662]
- [47] Lee CJ, Kang SY, Kim KI. Design of hierarchical routing protocol for heterogeneous airborne ad hoc networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Information Networking (ICOIN)*. Phuket: IEEE, 2014. 154–159. [doi: 10.1109/ICOIN.2014.6799683]
- [48] Gu WZ, Li JL, Zhang H, Sun QB, Yang FC. A cluster-based hybrid routing protocol for aeronautical ad hoc networks. *Int'l Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT)*, 2012,4(1):264–271.
- [49] Jonson T, Pezeshki J, Chao V, Smith K, Fazio J. Application of delay tolerant networking (DTN) in airborne networks. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM)*. San Diego: IEEE, 2008. 1–7. [doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753464]
- [50] Wu XY, Chen YW, Xu M, Peng W. TAFR: A TTL-aware message ferry scheme in DTN. In: *Proc. of the IEEE Computational and Information Sciences (ICCIS)*. Chongqing: IEEE, 2012. 1380–1383. [doi: 10.1109/ICCIS.2012.309]
- [51] Rosário D, Zhao Z, Braun T, Cerqueira E. Opportunistic routing for multi-flow video dissemination over flying ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE 15th Int'l Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Sydney: IEEE, 2014. 1–6. [doi: 10.1109/WoWMoM.2014.6918947]
- [52] Su JS, Hu QL, Zhao BK, Peng W. Routing techniques on delay/disruption tolerant networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(1):119–132 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3689.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03689]
- [53] Xiao QY, Xu K, Wang D, Li L, Zhong YF. TCP performance over mobile networks in high-speed mobility scenarios. In: *Proc. of the IEEE 22nd Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP)*. Raleigh: IEEE, 2014. 281–286. [doi: 10.1109/ICNP.2014.49]
- [54] Ono F, Takizawa K, Tsuji H, Lin S, Kagawa T, Miura R. Measurement of TCP and UDP performance over UAS relay networks. In: *Proc. of the IEEE Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Orlando: IEEE, 2014. 389–394. [doi: 10.1109/ICUAS.2014.6842278]
- [55] Çetinkaya EK, Rohrer JP, Jabbar A, Alenazi MJ, Zhang DS, Broyles DS, Sterbenz JP. Protocols for highly-dynamic airborne networks. In: *Proc. of the 18th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2012. 411–414. [doi: 10.1145/2348543.2348597]
- [56] Tu XJ, Li Q, Kou MY, Zhao CX, Xiong HG. Management of dynamic airborne network using cloud computing. In: *Proc. of the IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conf. (DASC)*. Williamsburg: IEEE, 2012. [doi: 10.1109/DASC.2012.6382347]
- [57] Xie JF, Wan Y, Namuduri K, Fu SL, Peterson GL, Raquet JF. Estimation and validation of the 3D smooth-turn mobility model for airborne networks. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM)*. San Diego: IEEE, 2013. 556–561. [doi: 10.1109/MILCOM.2013.101]
- [58] Biomo JDMM, Kunz T, St-Hilaire M. An enhanced Gauss-Markov mobility model for simulations of unmanned aerial ad hoc networks. In: *Proc. of the Wireless and Mobile Networking Conf. Vilamoura: IEEE, 2014. 1–8. [doi: 10.1109/WMNC.2014.6878879]*
- [59] Li J, Gong E, Sun Z, Liu W, Xie HW. AeroMTP: A fountain code-based multipath transport protocol for airborne networks. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015,28(4):1147–1162. [doi: 10.1016/j.cja.2015.05.010]
- [60] Jiang W, Huang S, Wang H, Xu X. Research on cross-layer optimization for intra-flight ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Computational Intelligence & Communication Technology (CICT)*. Ghaziabad: IEEE, 2015. 427–431. [doi: 10.1109/CICT.2015.58]

## 附中文参考文献:

- [12] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282-1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [13] 陈立家,江昊,吴静,郭成城,徐武平,晏蒲柳.车用自组织网络传输控制研究.软件学报,2007,18(6):1477-1490. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1477.htm>
- [14] 卢勇,赵有健,孙富春,李洪波,倪国旗,王殿军.卫星网络路由技术.软件学报,2014,25(5):1085-1100. <http://www.jos.org/1000-9825/4581.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004581]
- [21] 寇明延,赵然.现代航空通信技术.北京:国防工业出版社,2011.
- [22] 曾浩洋,田勇春,译.战术无线通信与网络-设计概念与挑战.北京:国防工业出版社,2014.
- [25] 郑博,张衡阳,黄国策,任清华.航空自组网的现状与发展.电信科学,2011,27(5):38-47.
- [26] 吴伟强,郑石,张钦宇.面向高动态高空平台网络的路由协议研究.通信学报,2012,33(1):153-159.
- [31] 王叶群,杨峰,黄国策.一种航空自组网中带差分服务的跳频MAC协议建模.软件学报,2013,24(9):2214-2225. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4335.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04335]
- [52] 苏金树,胡乔林,赵宝康,彭伟.容延容断网络路由技术.软件学报,2010,21(1):119-132. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3689.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03689]



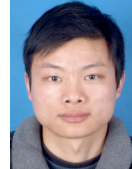
梁一鑫(1980—),男,江苏扬州人,博士生,主要研究领域为网络协议优化,网络测量.



郭晓军(1983—),男,博士生,主要研究领域为网络测量,网络安全.



程光(1973—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为网络测量与行为学,未来网络.



周爱平(1982—),男,博士生,CCF学生会会员,主要研究领域为网络测量,网络安全.