

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.09.020

引用格式:卓琨,张衡阳,郑博,等.机载网络 MAC 协议研究综述[J].电讯技术,2015,55(9):1058-1066. [ZHUO Kun,ZHANG Hengyang,ZHENG Bo,et al. Researches on MAC Protocols for Airborne Network;a Survey[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(9):1058-1066.]

机载网络 MAC 协议研究综述*

卓琨^{1,**},张衡阳¹,郑博^{1,2},戚云军²,贾航川³

(1. 空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077;2. 解放军 94188 部队,西安 710077;
3. 解放军 94162 部队,西安 710614)

摘 要:随着航空通信应用的不断深化、无线自组织网络研究的迅猛发展,机载网络介质访问控制(MAC)协议的研究已成为新的研究热点。首先总结和分析了机载网络 MAC 协议设计的应用需求,进而重点从信道接入方式角度综述了机载网络的基于竞争类 MAC 协议、基于调度类 MAC 协议、混合类 MAC 协议和跨层协议设计等四类 MAC 协议的研究进展,最后对比分析了各类典型协议的特点、性能和适用范围,并给出了需要进一步重点研究的问题,以期为从事该方面研究的人员提供参考。
关键词:航空通信;自组织网;机载网络;MAC 协议;竞争类 MAC 协议;调度类 MAC 协议;研究进展
中图分类号:TN925 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)09-1058-09

Researches on MAC Protocols for Airborne Network:a Survey

ZHUO Kun¹,ZHANG Hengyang¹,ZHENG Bo^{1,2},QI Yunjun¹,JIA Hangchuan³
(1. Information and Navigation College,Air Force Engineering University,Xi'an 710077,China;
2. Unit 94188 of PLA,Xi'an 710077,China;3. Unit 94162 of PLA,Xi'an 710614,China)

Abstract: With the constantly deepen application of aeronautical communications and the development in ad hoc network research development,airborne network medium access(MAC) protocol has become a new research hotspot. In this papaer,the main application characteristics and the design requirements of the airborne network are summarized firstly. Then a more detailed description of four important research topics of MAC protocols is given in view of channel access type,including contention-based MAC protocol,scheduling-based MAC protocol,hybrid MAC protocol and cross-layer protocol design. Finally,the characteristics,performance and application of various representative MAC protocols for airborne network are compared and analyzed,and the open research issues on MAC layer design are given in hope of providing reference for those engaged in this field.
Key words: aeronautical communication;ad hoc network;airborne network;MAC protocol;contention-based MAC protocol;scheduling-based MAC protocol;research progress

1 引 言

近年来,随着科技的不断进步和发展,将地面 ad hoc 网络应用于航空通信中就产生了新的研究领

域——机载网络(Airborne Network,AN)^[1],也称航空自组网(Aeronautical ad hoc Network)或机载自组网(Airborne ad hoc Network)。

* 收稿日期:2015-04-02;修回日期:2015-07-10 Received date:2015-04-02;Revised date:2015-07-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202490);航空科学基金资助项目(2013ZC15008)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61202490);The National Aerospace Science Foundation of China(2013zc15008)

** 通讯作者:zhuokun_TG@126.com Corresponding author:zhuokun_TG@126.com

由于传统航空通信中超短波通信距离受限,目前广泛使用的远程通信方案中,卫星通信存在着固有时延大、通信费用高昂、抗毁性差等缺点,短波通信信道质量的时变特性造成传输的高误码率、低速率。机载网络能够克服这两种通信方式的不足,通过机载航电设备的无线收发装置交换信息,借助其他节点中继实现多跳通信,可确保网络节点的互联互通,有效拓展地面设施的通信保障范围,共享空中飞行态势信息,为飞行决策提供有益参考。

机载网络可由多类飞行器节点组成,根据不同应用场景实现不同的任务目标:在民航上通过空中无线网络承载通信、导航、监视数据,计划实现包括空中交通管理、导航、紧急告警和自动防碰撞、互联网接入等多种服务在内的自由飞行,可有效提升航空平台的运行安全性、空管运行管控能力;军航除了完成上述功能外,还需要在作战飞机、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、预警机等军用航空飞行器之间通过战术数据链完成战斗任务管理,交换战场态势感知和敌我身份识别等数据,显著提升不同作战飞机之间的互操作性,可有效提高飞行安全性和效率,切实增强飞行员和武器操控者的战场态势感知能力。

目前,国内外对于机载网络的研究主要集中在网络连通性^[2]、移动模型^[3]、链路动态性^[4]以及网络协议^[5]等方面。而介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议作为网络协议栈的重要组成部分,决定多用户之间有限信道资源的共享方式,对网络整体性能起着决定性作用,是机载网络协议研究的基础性工作。

本文第 2 节对航空环境中机载网络的 MAC 协议的设计需求进行分析总结,第 3 节从不同信道接入方式对协议进行分类综述,第 4 节简要总结对比主要协议的特点、性能和适用范围,最后总结了当前研究存在的问题并展望下一步的研究重点。

2 机载网络 MAC 协议应用需求

机载网络是将一定空域内的航空飞行器当作网络节点,节点间能够互相转发处理信息,当传播距离受限、任务需要时可通过卫星中继传输或直接传回到陆基处理中心的新型移动通信网络,是地面移动 ad hoc 网络(Mobile ad hoc Network, MANET)思想延伸到航空领域的新应用。相比于地面移动通信网

络,机载网络的传播媒介——航空信道和信息载体——网络中的航空器节点均具有其独特性,由此也衍生出 MAC 协议设计的额外挑战和特殊性需求。

2.1 航空信道特点

自由空间中航空无线电波传播的研究主要集中在视距传播,但在某些情况下,反射、折射、地波/天波等其他传播机制将会起作用。巡航场景符合机载网络的实际运行情况,其航空信道具有以下特点:

(1)多普勒频移影响较大。航空器节点的高速移动会带来多普勒效应,即信号发送周期小于相关时间时多普勒扩展将引起时间选择性衰落,导致信号失真;

(2)航空信道误码率较高。航空信道传播机制多样,具有时延-频率变化特性,多径干扰因此较为突出。多径传播及外来噪声会降低传播信号质量,增大了传输过程中的误码率;

(3)传播延迟不可忽视。巡航场景的信道属于快衰落,其空空链路在相距 300 km 时大尺度信道衰落的最大回波延迟为 1 ms,最大绕射传输距离可近似为 2 倍飞机高度。不可忽视的传播延迟会对协议性能产生严重影响,因此地面移动通信网络所使用的成熟 MAC 协议难以直接应用。

2.2 网络节点特点

机载网络的网络节点是由各类航空器所组成,因而网络的基本特性将会由航空器的运行特点所决定,多类航空器节点组成的机载网络也将会表现出与地面 MANET、车载自组网(Vehicular ad hoc Network, VANET)截然不同的特点:

(1)节点的三维大尺度稀疏分布。首先,航空器节点在三维空间内飞行具有不同航迹和姿态,其移动模型有别于传统地面 MANET;其次,目前主要使用的 U/V 频段单跳通信距离可达数百公里,多跳通信的网络拓扑范围很大;再次,在实际广阔的运行场景中节点稀少、密度小,可能会造成网络无法连通,因而网络连通性将会是组网可行性的先决条件;

(2)网络的异构性、临时性显著。因为航空器类型和型号的不同,网络中的不同节点在通信设备、半径、功能上都可能存在差异,同时在群组飞行模式中节点的地位不同,因此网络具有异构特性;另一方面,军民航飞机在一定空域内不同时间段的飞行流量变化很大,因而节点构建成网络的临时性较强;

(3)网络拓扑的高动态变化。航空器节点的高

速移动会造成网络拓扑的高动态变化,对通信链路的通断和数据传输的实时性、可靠性造成影响。

2.3 MAC 协议设计需求

MAC 层处于机载网络协议栈中数据链路层的底层部分,负责协调各个节点分配有限的通信资源,是保证网络高效运行的关键要素。在机载网络 MAC 协议的设计中应该考虑到如下因素:

(1)组网方式灵活快速。航空节点频繁地入退网,高速移动会造成节点间相对位置的持续改变,从而带来拓扑结构、通信链路通断的高动态变化。虽然 ad hoc 网络结构具备动态性和灵活性,但 MAC 需要实现通信链路的快速建立、优化信道接入控制便于实现相对公平的资源分配;

(2)多优先级业务支持。在航空通信中不论是军航、民航需求传输的业务类型都是多样化的,不同的业务类型对信息产生间隔、传输时延要求不尽相同,因而机载网络 MAC 协议的设计必须支持多优先级业务类型传输;

(3)在军用航空通信中,机载网络也需要具备高速低时延、抗干扰低截获的传输能力。机载网络实际运行中需要实现多机协同信息的有效共享,在军用领域需要及时获取、传递攻击目标的相关信息,而移动目标打击、武器控制类信息的时延敏感度在 ms 级,高传输速率也将是低时延的保证。军事通信战术信息的传输对抗干扰、低截获能力提出了更高的要求,但航空信道影响和敌对方的主动入侵、被动窃听、拒绝服务等网络攻击都会对机载网络的安全性、可靠性传输提出挑战。因此,从军航机载网络 MAC 协议的角度来讲,高数据传输速率是基础,信道接入控制方面要确保高优先级分组的一次接入成功传输概率;如果能以多信道跳频机制和具备信道认知能力的方式传输,就可避开那些已占用或受干扰较重的信道,从而在确保分组接入时延的基础上进一步提升抗干扰、低截获能力。

3 机载网络 MAC 协议研究现状

目前国内外研究人员针对机载网络的不同应用场景提出了多种 MAC 协议,但还没有统一的分类方法。依据信道访问策略的不同,可将 MAC 协议分为基于竞争类 MAC 协议、基于调度类 MAC 协议、混合类 MAC 协议和跨层设计类 MAC 协议,其具体分类情况如图 1 所示。

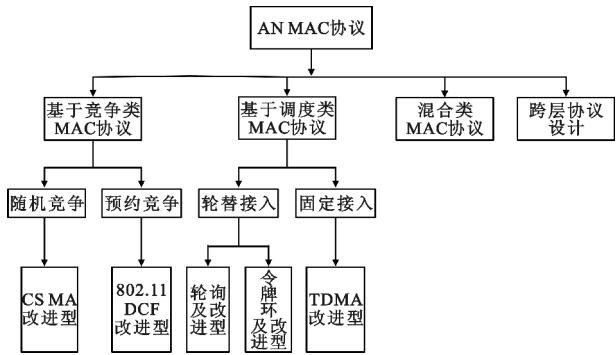


图 1 机载网络 MAC 协议分类
Fig. 1 Classification of MAC protocol of AN

下面通过对当前机载网络应用特点的研究,并基于上述 MAC 协议的设计需求、分类方法的考虑,按照 MAC 协议的不同类型,对其中较为代表性协议的核心实现机制、特点及优缺点等进行分析。

3.1 竞争类 MAC 协议

基于竞争类 MAC 协议的基本思想是通过竞争方式使用无线信道,当发生碰撞时则按照某种退避机制执行退避过程直到数据成功发送或延迟溢出。竞争类 MAC 协议的基本类型是 ALOHA 和 CSMA。虽然随机竞争类 MAC 协议实现简单方便,具有时延特性的优势,但碰撞概率会随网络负载呈指数增长,造成网络性能严重下降。依据不同的冲突避免方式,机载网络竞争类 MAC 协议主要可分为两类:一类是在 CSMA 原理基础上加入网络接入权限来限制分组接入的冲突避免;另一类是采用控制帧握手方式的信道预约机制,通过预约方式申请信道,典型代表是 802.11 DCF。

3.1.1 统计优先级的多址接入协议

典型代表系统是美军 TTNT 数据链,100 n mile 距离的信息延迟时间要控制在 2 ms 内。由于 TDMA 协议时隙结构的限制无法满足如此低时延要求,为此美军设计了 SPMA^[6-7] (Statistical Priority-Based Multiple Access) 协议。该协议基于 CSMA 和异步跳频机制,通过统计信道占用情况实现不同优先级分组的接入控制来确保网络性能。SPMA 协议大大降低了分组接入信道前的等待时间,提供了对不同优先级业务的区分服务,并保证了高优先级业务的一次传输成功率和低时延接入,非常适合于军事航空通信领域应用。但由于美军技术封锁的原因,只能了解协议基本原理,诸多具体技术环节的选择、参数设置情况还不得而知。

王叶群等^[8]利用排队模型、组合理论和离散

Laplace 变换等理论对基于多信道、异步跳频、Turbo 编码的航空自组网 MAC 协议进行了分析验证,其性能要全面优于 802.11 DCF,并在牺牲少许分组传输成功率、系统吞吐量的代价下获得了比 TDMA 更优异的时延性能。在此基础上文献[9]提出了吞吐量自适应 AFH-MAC 协议,探讨了分组到达率与系统吞吐量的关系,并将获得最大吞吐量的分组到达率数值设置为分组接入的网络忙闲程度阈值,相比于其他基本协议获得了最大的系统吞吐量;同时业务负载大于阈值时,在平均时延增加的情况下仍优于其他协议。文献[10]中提出了优先级区分的 PFH-MAC 协议,主要目标是在确保高优先级分组的实时性、可靠性基础上最大化系统吞吐量,在不同分组到达率情况下以分组传输成功率为网络忙闲程度门限接入值,以牺牲低优先级分组的性能为代价满足高优先级分组的传输成功率需求。

文献[11-13]在 S-ALOHA 机制基础上引入了多信道优先级统计机制(Multi-channel Priority Statistics, MPSC),并对协议栈下层进行了重新设计以配合相应机制的实现。文献[11]探讨了信道资源的分配机制;文献[12]对协议的实现机制进行了系统描述;文献[13]对时帧结构进行了具体描述,仿真结果表明相比于其他基本协议,获得了更好的网络性能,但关键参数设置仍需进一步优化研究。

文献[14]针对 SPMA 低优先级业务时延较大的问题,提出了一种改进的多信道低时延高负载均衡机制(Priority Balancing based on Low Latency under High Load, PBLL/HL),其主要改进机制体现在接入阈值设定浮动窗口、退避算法中竞争窗口依据发送成功、失败而变化来确保增大低优先级业务的接入成功概率,仿真验证了算法性能、公平性的提高,但对统计预定周期的最优化问题需要进一步进行研究。

3.1.2 预约竞争类 MAC 协议

预约竞争类多采用 IEEE 802.11DCF 协议,其核心机制是 CSMA/CA,也是大多数机载网络路由协议研究所采用的默认 MAC 协议,通过使用控制帧握手机制能够有效解决隐藏终端问题,但航空环境中不可忽视的传播时延会对信息时延、网络性能造成严重影响,因此并不适合在航空环境中直接应用。

文献[15]针对无人机编队的协作控制系统,在编队内网络固定数据速率条件下,通过将每个节点建模为 M/M/1 排队系统得到了通信业务清闲条件下的平均单跳时延,仿真结果显示平均单跳时延将

会随网络规模、数据包产生速率的增大而增加,重负载条件下平均单跳时延的理论推导相比于轻负载情况下明显偏高。文献[16]统计分析了单跳无人机自组网在衰落信道条件下非饱和流量的数据包时延性能,其 MAC 层是以 802.11 DCF 为基础,通过将每个节点建模成排队系统得到了平均时延,理论推导和仿真结果表明 M/M/1 更符合实际情况;同时利用分布拟合工具分析了误包率为 0 情况下的概率分布函数,发现数据包时延可近似为确定性时延之和而随机时延则服从于 Gamma 分布函数。

文献[17]针对集群状态的 UAV 在采用分簇结构情况下利用 Bellman-Ford 算法同时优化了中继节点的传输时间和能量消耗,提出了一种协作中继的 802.11 DCF 协议,在不同网络规模、节点数量下对比分析了网络性能,联合优化能够有效减少网络传输时间、能量消耗,但会随节点距离、数目增大的影响而变大。

针对无人机编队分布式协同,文献[18]改进了传统 802.11 DCF 中的 BEB 算法,直接给定节点一个随机常数竞争窗口值 CCW 来进行退避时隙数的选择,对比分析了不同网络规模下竞争窗口与吞吐量、系统时延间的关系;文献[19]利用最优最小竞争窗口机制,并通过所提的站点数目估计算法(Statistic-DCF, S-DCF)来实时估计网络中竞争站点的数目,仿真结果显示了 S-DCF 算法估计的准确性和网络性能的提升。

3.2 调度类 MAC 协议

调度类 MAC 协议根据通信资源的不同分配机制可分为轮替接入和固定接入两类。轮替接入主要包括轮询多址和令牌环两种方式。轮询多址方式中节点只能在轮询周期内才能与中心节点通信,所承载的网络规模较小、抗毁性差;而令牌传递的实质就是一种分布式轮询,将网络中的工作节点组成环状拓扑后传递令牌,所传信息随着令牌的传递直至目的节点。轮替接入在一定网络规模时可确保节点信息传输的实时性。固定接入的基本思想是:采用某种分配算法将特定数量的时隙/频率/正交码映射到某节点,这种映射导致节点只能使用其特定的通信资源,虽然有效避免了冲突,但也限制了节点在特定时刻突发业务的直接传送。在机载网络中固定接入通常以 TDMA 为主,考虑到频谱资源的稀缺性和计算复杂度,FDMA 和 CDMA 应用较少。

3.2.1 轮替接入类 MAC 协议

采用轮询多址的典型代表系统是美军的 Link-

11 数据链。在现有集中式轮询的基础上,文献[20]提出了一种自适应轮询 MAC 协议,通过对报文数量的贝叶斯估计,高概率选择高优先级站点先进行轮询,一定程度上解决了不同优先级的时延上限保证、拓扑变化造成的空轮询问题,提供了更高的信道利用率、区分服务的能力。针对直升机战术数据链网络的通信需求,文献[21]提出了一种多链路轮询网络结构,构建了“主站、长机、僚机”三级轮询方式,并规定了网内节点的不同通信方式,相比于多网级联轮询方式获得了更好的网络性能。文献[22]结合 UAV 的 Markov 飞行状态、Gilbert-Elliot 信道模型和分组优先级,提出了 UAV 数据链的多链路协作轮询策略 (Multi-link Cooperative Polling Scheme, MCPS),依据优先级来动态选择通信链路和进行时隙分配,仿真验证了网络性能的提升。

令牌传递的过程实质上就是一种分布式轮询。文献[23]提出了一种基于全双工和多包接收的无人机自组网 MAC 层令牌 (token-based) 协议,通过信道状态信息的更新和基于令牌结构可有效消除传输碰撞,在不完全信道状态信息的条件下仿真验证了 MAC 协议的有效性。

3.2.2 固定接入类 MAC 协议

固定接入通常以 TDMA 为主,典型代表系统是美军的 Link-16、Link-22 数据链,其基本原理是通过为每个节点分配独立的数据发送、接收时隙,可有效避免竞争机制中的碰撞重传、控制包开销问题。

文献[24]针对远洋地区航空交通中飞机位置、气象信息的传输需求中保护间隔的划分必须要适应航空环境中传播延迟的问题,在 TDMA 协议基础上提出了 ACK 的延迟机制,即发送方在下一帧保护间隔中利用捎带机制接收 ACK,有效提高了网络性能,并在文献[25]中利用位置信息解决 ACK 保护间隔问题,所提出的 LBTM (Protocol Termed Location-Based TDMA) 协议能有效支持各类广播模式,接收节点通过位置信息计算与发送节点的传播时延,可有效减少 ACK 的保护间隔实现无碰撞传输,从而获得更好的时延性能。

针对航空武器数据链的实时性传输需求,文献[26]提出了一种 TDMA 协议改进型 ODTFMA (Orthogonal Domain Time and Frequency Multiple Access),该协议在依据网内武器平台数分配时隙的基础上分频传输,有效提升了网络时延性能。在此基础上,文献[27]加入了 CDMA 思想提出了 ODTCFMA 协议,并设计了相应的超帧结构,获得了较高的

时延性能;但这类协议实现较为复杂,网络可扩展性较差。文献[28]针对 ad hoc 网络结构的无人机编队,从编队内部实现了分布式自主定位,并分析了锚定节点比例与定位误差之间的关系;同时对固定 TDMA 协议加入业务优先级和竞争机制;仿真验证了所提协议在分组发送成功率和端到端平均时延等性能上的提高,但定位精度与竞争时间还需进一步优化。

针对航空自组网的网络拓扑、链路状态存在频繁变化的特点,文献[29]提出了一种基于干扰的分布式 TDMA 算法 (Interference-based Distributed TDMA Algorithm, IDTA),其主要特点是在收发节点同时考虑链路干扰情况。该文献对链路干扰程度、时隙结构进行了定义,本地节点通过建立自身、邻居节点的链路干扰、时隙分配情况,并结合业务优先级进行通信链路的选择,仿真验证了 IDTA 随着节点移动速度的增加相比 STDMA 获得了更高的时延性能。文献[30]建立了面向连接的时隙分配数学模型,并以最小化网络时延为优化目标,通过分布式计算机制综合考虑优先级、时隙占用、链路干扰等情况,获得了更高的系统吞吐量和时延性能,但时隙分配仍可从动态分配机制、不同优先级可变帧长等进行进一步优化。

3.3 混合类 MAC 协议

混合协议包括竞争类协议和调度类协议的设计要素,能带来协议组合后的优点和避免各自的不足,有利于网络全局优化,但也会带来复杂度高、难于实现的问题。如上文的部分动态 TDMA 协议也可划分到混合协议的范畴,表现出了总体以 TDMA 协议为主,其他竞争类协议辅助的特性。

文献[31]提出了一种基于 TDMA 的机载网络令牌环协议 (Token Cycle Scheduling, TCS),各节点能以自由竞争方式交互控制信息,并对协议的时隙结构、令牌传输机制、入/退网流程做了详细的描述,仿真验证了相比 EDCA 获得了网络性能的提升,但对时隙分配算法还有进一步优化的必要。

文献[32]针对基于 CDMA 的协作军用平台自组网,在假设节点具有多用户检测技术条件下,通过令牌帧的循环获取邻居节点的流量信息,收发方可协作决定数据包的发送,且该协作 MAC 机制允许多节点同时给单节点发送数据包;仿真结果表明协议在网络重负载和多用户情况下仍然适用,但时延将会随业务量的增长而显著增加。文献[33]假设基于 CDMA 的无人机自组网执行监视任务,其节点具

有多用户检测能力,并提出了一种收方前置模块的令牌循环方案,能够近乎实时地探测隐藏邻居节点,给码元无冲突分配空分复用的编码信道,实现分布式协作数据传输,支持多对一传输模式,理论分析和仿真结果表明该方案在网络负载较重时仍适用于网内大量节点应用,但会随网内流量的增加带来时延快速增长。

3.4 跨层设计类 MAC 协议

当前大部分机载网络 MAC 协议的研究仍然沿着有线网络分层设计的思想,虽然具有稳定性强、兼容性好、设计简单等优势,但协议栈各层关心的指标不同而造成层间交互、共享信息的不足,实际上某层单一性能的改善并不一定能带来网络全局性能的提升,因而跨层协议优化将是改善 MAC 协议性能的一个重要研究方向。

针对航空骨干网的高移动性特点、低时延需求,文献[34]设计了一种跨层协议机制,物理层采用定向天线和 GPS 设备,MAC 层采用了分布式 STDMA 机制实现链路分配策略,网络层采用了一种网状树(其中包含了簇首的构造、簇内反应路由、簇间先应路由)混合路由,仿真对比验证了报文、数据包的网路性能,但网络开销主要集中在 MAC 层,因而仍有

优化必要。在此基础上,文献[35]详细描述了网状树算法推选簇首的流程以及时隙结构(包括控制帧、数据帧、临时帧)的构造,仿真验证了不同节点数条件下的网络性能,但网络性能将会随节点数的增加而下降。

文献[36]针对战术通信、航空遥测等应用的高动态无线环境,提出了一种特定领域应用结构(在应用层上增加了任务层),包括物理层、链路层、网络层、传输层的跨层优化方案。在物理层、链路层采用了 iNET 项目标准,在网络层设计了一种基于地理位置的高动态路由算法 AeroRP、与 IP 协议兼容的 AeroNP 协议,传输层提出了 TCP-Friendly 的 AeroTP 传输协议。链路层 TDMA 参数优化、时隙分配基于传输层参数和 QoS 要求,仿真验证了所提协议在端到端性能上的提升,但需要在节点密度、移动模型、多径编码机制上参考现实情况加以改进。

4 机载网络 MAC 协议比较分析

对于机载网络中 MAC 协议的不同应用,不同类型的协议具有各自的特点、网络性能和适合场景,在网络负载较重时不同协议相对性能比较情况如表 1 所示。

表 1 机载网络 MAC 协议比较
Table 1 Comparison among MAC protocols for AN

协议	类型	信道数	同步	延迟	吞吐量	信道利用率	扩展性	应用范围	不足
PFH-MAC	随机竞争	多信道	不需要	好	中	好	好	军事应用	低优先级 QoS 保障
MPSC	随机竞争	多信道	需要	好	中	中	好	军事应用	抗干扰、截获能力较差
S-DCF	预约竞争	单信道	不需要	差	差	中	好	编队内协同	节点距离远时性能下降
MCPS	轮询	单信道	需要	差	差	好	中	编队内协同	节点数增多时性能下降
TOKEN	令牌环	多信道	不需要	中	中	好	中	民用	节点数增多时性能下降
LBTM	固定接入	单信道	需要	中	好	中	差	民用、航管	节点入、退网不便
DOTFMA	固定接入	多信道	需要	好	中	好	差	军事应用	信道分配机制复杂
IDTA	固定接入	单信道	需要	中	中	差	中	民用	信道利用率较低
TCS	混合	单信道	需要	差	好	中	差	民用	实现较为复杂
AeroTP	跨层	单信道	需要	好	好	中	差	民用	实现较为复杂

从表 1 中可以看出:
(1)竞争类协议在需要网络资源时才进行申请,新节点的加入只需等待当前传输完成,具有对高动态拓扑变化容忍性强的优势。基于优先级统计类协议能够满足军事航空通信需求,但从当前的研究进展来看,其关键技术环节的设置、门限参数的选取仍然受限于特定网络条件下,且以某类参数作为阈值的选择标准不一定能带来网络整体性能的提升,

具有普遍一般性的研究结论较少,值得在未来进一步研究明确。而基于预约竞争类 MAC 协议由于航空环境的特殊性而不能直接应用,适用于战术编队内部(节点间距离较近)的网络通信环境,且在网络内节点数、流量较大时性能下降严重,因此该协议的应用背景局限性较大;

(2)调度类协议在系统运行初期就需将资源规划分配好,新节点的加入会带来资源的重新分配,因

而该类协议的可扩展性相对较差。轮替接入类协议因其信道利用率高的优势,适合应用于信道资源较少的场合,但是当网络内节点数、分组数较大时将会带来网络性能的严重下降。固定接入类(主要是 TDMA)协议多被民航、航管科研项目所采用,其优势在于网络的竞争冲突小,在网络负载较重时仍能保持可观的网络性能,适用于节点航迹相对固定、时延要求不是特别高的场合。调度类协议虽然有效避免了竞争冲突,但在负载较重时某节点的突发类业务的低时延传输需求无法保证,因而不太适用于军事航空通信场合;

(3)混合类、跨层设计类 MAC 协议因为协议性能的优越性将会是未来研究的热点。由于这两类协议融合了多类机制、信息,因此,在网络性能上将会带来优势,但需要注意的是实现中的复杂度、标准化推广问题。

5 结束语

近年来,研究人员对机载网络 MAC 协议新的应用特点和需求开展了大量研究,但由于面向的具体应用不同,因而在采用的技术手段、关注的网络性能、具体优化指标、协议交互处理范围等方面都不尽相同,具体应用效果差异性较大。实际上,机载网络 MAC 协议的研究发展趋势并没有呈现出收敛特性,不存在一种能够解决所有问题、满足所有需求的 MAC 协议,原因在于:MAC 协议的设计思路主要由 AN 的应用场景来决定,应用的不同使得 MAC 协议侧重不同的网络性能,只能在多个性能指标之间权衡折衷,而无法全面兼顾;MAC 协议受下层物理层、硬件平台的影响较大,而作为协议栈基础架构的物理层目前尚缺乏统一标准。

比较分析机载网络不同 MAC 协议,对机载网络 MAC 协议的理论实践研究,在满足应用需求、网络性能提升上都具有一定的参考作用。在下一步的实际化部署应用中,MAC 协议仍需在稳定性、鲁棒性、安全性和扩展性等方面的基础问题和关键技术进行进一步研究解决:

(1)提高信息传输的时效性、可靠性是 MAC 协议设计的首要目标,但不应只是唯一目标。随着未来常规化的应用,不同优先级分组的成功传输概率、系统吞吐量等性能的重要程度将会日益突出;

(2)现有业务优先级的设置使得业务类型具有特殊性,对不同优先级业务需求性能的研究还存在

片面性问题,未来需要在明确需求的基础上,有针对性地进行相关 MAC 协议设计;

(3)目前 MAC 协议的安全形势依然严峻。尽管还没有有效的手段去彻底解决安全隐患,但做到防止窃听、恶意攻击还是非常有必要的;

(4)现有 MAC 协议对节点的动态加入、退出网络、链路失效应应对措施的支持明显不足,限制了网络的可用性、扩展性。随着面向实用化趋势的到来,网络支撑能力研究的紧迫性日益明显;

(5)当前理论研究的通信链路、移动模型等假设条件过于理想简化,极大妨碍了 MAC 协议研究成果的转化,因此,需要对更加符合现实的通信模型加以开发,且不能止步于仿真实验,必须向原型系统、实验系统过渡,争取早日将理论研究成果转化为网络标准设备。

参考文献:

- [1] Kwah K J, Sagduyu Y, Yackoski J, et al. Airborne Network Evaluation: Challenges and High Fidelity Emulation Solution [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52 (10): 30-36.
- [2] 罗长远, 宋玉龙, 高瞻瞻. 固定航线的航空自组网连通性研究 [J]. 通信学报, 2014, 35 (9): 147-155.
LUO Changyuan, SONG Yulong, GAO Zhanzhan. Connectivity on fixed air route in aeronautical ad hoc networks [J]. Journal on Communications, 2014, 35 (9): 147-155. (in Chinese)
- [3] 郑博, 张衡阳, 黄国策, 等. 三维平滑移动模型的设计与实现 [J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38 (6): 179-184.
ZHENG Bo, ZHANG Hengyang, HUANG Guoce, et al. Design and implementation of a 3-D smooth mobility model [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38 (6): 179-184. (in Chinese)
- [4] 郑博, 黄国策, 张衡阳. 三维移动 Ad hoc 网络链路动态性研究 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33 (11): 2605-2609.
ZHENG Bo, HUANG Guoce, ZHANG Hengyang. Link Dynamics in Three-dimensional Mobile Ad hoc Networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33 (11): 2605-2609. (in Chinese)
- [5] Rosati S, Kruzelecki K, Traynard L, et al. Speed-Aware Routing for UAV Ad-Hoc Networks [C] // Proceedings of GLOBECOM 2013. Atlanta, GA: IEEE, 2013: 9-13.
- [6] Stephen M C, Kelli A H, Scott J F Z. Statistical Priority-based Multiple Access System and Method: USA, 7680077 B1 [P]. 2010.
- [7] John C H. Method and Apparatus for Wireless Data using Doppler Information: USA, 8614997 B1 [P]. 2013.
- [8] 王叶群, 杨锋, 叶向阳, 等. 一种支持实时性业务的多信道 MAC 协议 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (8):

- 3098–3102.
- WANG Yequn, YANG Feng, YE Xiangyang, et al. Multi-channel media access control protocol for real-time traffic [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29 (8): 3098–3102. (in Chinese)
- [9] 王叶群, 叶向阳, 戚云军, 等. 一种跳频 MAC 协议的自适应机制[J]. *西安电子科技大学学报*, 2013, 40 (5): 78–85.
- WANG Yequn, YE Xiangyang, QI Yunjun, et al. Adaptive mechanism for the frequency hopping MAC[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40 (5): 78–85. (in Chinese)
- [10] 王叶群, 杨锋, 黄国策, 等. 一种航空自组网中带差分服务的跳频 MAC 协议建模[J]. *软件学报*, 2013, 24 (9): 2214–2225.
- WANG Yequn, YANG Feng, HUANG Guoce, et al. Media access control protocol with differential service in aeronautical frequency-hopping ad hoc networks[J]. *Journal of Software*, 2013, 24 (9): 2214–2225. (in Chinese)
- [11] 卞东亮, 张红梅, 彭沙沙, 等. 一种基于多信道统计的 Ad Hoc 网络 MAC 层协议[J]. *空军工程大学学报*, 2013, 14 (2): 80–84.
- BIAN Dongliang, ZHANG Hongmei, PENG Shasha, et al. An improved protocol of ad hoc based on multichannel statistics on MAC layer[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2013, 14 (2): 80–84. (in Chinese)
- [12] 彭沙沙, 张红梅, 卞东亮, 等. 一种新型战术数据链 MAC 协议[J]. *计算机科学*, 2013, 40 (7): 32–35.
- PENG Shasha, ZHANG Hongmei, BIAN Dongliang, et al. New MAC layer protocol of tactical data link[J]. *Computer Science*, 2013, 40 (7): 32–35. (in Chinese)
- [13] 张红梅, 彭沙沙, 赵玉亭, 等. 基于多信道统计的战术数据链 MAC 协议[J]. *火力与指挥控制*, 2014, 39 (8): 137–141.
- ZHANG Hongmei, PENG Shasha, ZHAO Yuting, et al. A MAC Layer Protocol of Tactical Data Link Based on Multi-channel Priority Statistics [J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39 (8): 137–141. (in Chinese)
- [14] 张伟龙, 吕娜, 杜思深. 应用于航空 Ad Hoc 网络的高负载优先级均衡 MAC 协议[J]. *电讯技术*, 2014, 54 (5): 656–661.
- ZHANG Weilong, LYU Na, DU Sishen. A Balancing Priority MAC Protocol under High Load for Aviation Ad Hoc Network [J]. *Telecommunication Engineering*, 2014, 54 (5): 656–661. (in Chinese)
- [15] Li J, Zhou Y F, Lamont L, et al. Analysis of One-Hop Packet Delay in MANETs over IEEE 802. 11 DCF[J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 49 (8): 447–456.
- [16] Li J, Zhou Y F, Lamont L, et al. Packet Delay in UAV Wireless Networks Under Non-saturated Traffic and Channel Fading Conditions[J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 72 (2): 1105–1123.
- [17] Ho D T, Grlti E I, Shimamoto S, et al. Optimal Relay Path Selection and Cooperative Communication Protocol for a Swarm of UAVs [C]//*Proceedings of GLOBECOM 2012*. Atlanta, GA: IEEE, 2012: 1585–1590.
- [18] 吕娜, 徐德民, 王文艺, 等. 编队协同中的 Ad Hoc 网络 MAC 协议[J]. *空军工程大学学报*, 2009, 10 (2): 56–59.
- LYU Na, XU Demin, WANG Wenyi, et al. AMAC Protocol Analysis of Formation Cooperation Based On Wireless Ad Hoc Networks [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2009, 10 (2): 56–59. (in Chinese)
- [19] 吕娜, 徐德民, 张岳彤, 等. 一种用于编队协同的 Ad Hoc 网络 MAC 协议[J]. *火力与指挥控制*, 2010, 35 (5): 52–54.
- LYU Na, XU Demin, ZHANG Yuetong, et al. A MAC Protocol Analysis of Formation Cooperation based on Wireless Ad Hoc Networks [J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35 (5): 52–54. (in Chinese)
- [20] 王文政, 周经伦, 罗鹏程. 战术数据链系统自适应轮询 MAC 协议[J]. *兵工学报*, 2009, 30 (12): 1624–1631.
- WANG Wenzheng, ZHOU Jinglun, LUO Pengcheng. Adaptive Polling MAC Protocol for Tactical Data Link System [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30 (12): 1624–1631. (in Chinese)
- [21] 赵琪, 毛玉泉, 任浩. 直升机战术数据链的轮询组网方式分析[J]. *电讯技术*, 2010, 50 (11): 5–9.
- ZHAO Qi, MAO Yuquan, REN Hao. Poll Network Mode Analysis of Tactical Data Link for Helicopter [J]. *Telecommunication Engineering*, 2010, 50 (11): 5–9. (in Chinese)
- [22] 毛玉泉, 李思佳, 李波, 等. 一种新的多链路轮询方案[J]. *重庆邮电大学学报*, 2011, 23 (5): 585–592.
- MAO Yuquan, LI Sijia, LI Bo, et al. A new multi-link cooperative polling scheme [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 23 (5): 585–592. (in Chinese)
- [23] Cai Y G, Yu F R, Li J, et al. Medium Access Control for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Ad-Hoc Networks With Full-Duplex Radios and Multipacket Reception Capability [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62 (1): 390–394.
- [24] Jang H, Noh H, Lim J. Airborne TDMA for High Throughput and Fast Weather Conditions Notification [J]. *International Journal of Computer Networks & Communications*, 2011, 3 (3): 206–220.
- [25] Jang H, Kim E, Lee J J, et al. Location-Based TDMA MAC for Reliable Aeronautical Communications [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Letters*, 2012, 48 (2): 1848–1854.
- [26] 王翔, 吕娜, 张岳彤. 武器数据链多址接入技术研究[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47 (5): 77–79.
- WANG Xiang, LYU Na, ZHANG Yuetong. Research on multiple access technology of weapon data link [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47 (5): 77–79. (in Chinese)

- [27] 段荣,吕娜,王翔. 一种航空武器数据链 MAC 协议设计与研究[J]. 现代防御技术,2011,39(5):60-65.
DUAN Rong, LYU Na, WANG Xiang. Design and Research of Aeronautical Weapon Data Link MAC Protocol [J]. Modern Defense Technology, 2011, 39(5): 60-65. (in Chinese)
- [28] 韩海艳,马林华,田雨,等. 无人机编队中的自主定位与动态 TDMA 协议应用[J]. 电光与控制. 2012, 19(9):29-32.
HAN Haiyan, MA Linhua, TIAN Yu, et al. Self-Localization and Application of Dynamic TDMA in UAV Formation[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(9): 29-32. (in Chinese)
- [29] Li J, Gong E L, Sun Z Q, et al. An Interference-Based Distributed TDMA Scheduling Algorithm for Aeronautical Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Beijing:IEEE, 2013:453-460.
- [30] 李杰,宫二玲,孙志强,等. 航空自组网 STDMA 时隙分配算法的设计与实现[J]. 航空学报, 2014, 35(12):3371-3383.
LI Jie, GONG Erling, SUN Zhiqiang, et al. Design and implementation of STDMA slot allocation algorithm for aeronautical ad hoc networks [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35 (12): 3371 - 3383. (in Chinese)
- [31] Guo Z H, Chen Y G, Duan M Y, et al. A Token cycle scheduling of MAC protocols for TDMA based airborne Ad Hoc network [C]//Proceedings of IC-BNMT 2009. Beijing:IEEE, 2009:28-32.
- [32] Li J, Zhou Y F, Mathieu D Z, et al. Cooperative MAC Scheduling in CDMA-MANETs with Multiuser Detection [J]. Ad Hoc Networks, 2012, 89(9):131-146.
- [33] Li J, Zhou Y F, Lamont L, et al. A token circulation scheme for code assignment and cooperative transmission scheduling in CDMA-based UAV ad hoc network [J]. Journal Wireless Networks, 2013, 19(6):1469-1484.
- [34] Huba W, Martin N, Al-Mousa Y, et al. A Distributed Scheduler for Airborne Backbone Networks with Directional Antennas [C]//Proceedings of 2011 3rd International conference on communication systems and networks. Bangalore:IEEE, 2011:1-4.

- [35] Al-Mousa Y, Huba W, Shenoy N. An Integrated TDMA-Based MAC and Routing Solution for Airborne Backbone Networks Using Directional Antennas [C]//Proceedings of 7th International Conference on Networking and Services. Virginia:IEEE, 2011:234-239.
- [36] Rohrer J P, Jabbar A, Egemen K C, et al. Highly-Dynamic Cross-Layered Aeronautical Network Architecture [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4):2742-2765.

作者简介:



卓 琨(1987—),男,陕西武功人,2011年获工学硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为军事航空通信;

ZHUO Kun was born in Wugong, Shaanxi Province, in 1987. He received the M. S. degree in 2011. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns military aeronautical communication.

Email:zhuokun_TG@126.com

张衡阳(1978—),男,湖南衡阳人,2008年获工学博士学位,现为副教授,主要研究方向为航空自组网;

ZHANG Hengyang was born in Hengyang, Hunan Province, in 1978. He received the Ph. D. degree in 2008. He is now an associate professor. His research concerns aeronautical ad hoc network.

郑 博(1982—),男,陕西咸阳人,2011年获工学博士学位,现为工程师,主要研究方向为航空自组网;

ZHENG Bo was born in Xianyang, Shaanxi Province, in 1982. He received the Ph. D. degree in 2011. He is now an engineer. His research concerns aeronautical ad hoc network.

戚云军(1978—),男,山东武城人,2006年获工学硕士学位,现为讲师,主要研究方向为军事通信组网;

QI Yunjun was born in Wucheng, Shandong Province, in 1978. He received the M. S. degree in 2006. He is now a lecturer. His research concerns military communication networking.

贾航川(1989—),男,陕西西安人,2013年获工学硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为航空自组网。

JIA Hangchuan was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1989. He received the M. S. degree in 2013. He is now an assistant engineer. His research concerns aeronautical ad hoc network.