

面向无人机自组网和车联网的媒体接入控制协议研究综述

董超^① 陶婷^{*①} 冯斯梦^① 屈毓臻^② 刘青昕^① 吴钰蕾^① 张珉^①

^①(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

^②(上海交通大学计算机科学与工程系 上海 200240)

摘要: 随着移动通信技术的迭代更新,车联网(VANET)和无人机自组网(FANETs)已成为通信网络的重要组成部分,而媒体接入控制(MAC)协议则是移动自组织网络未来发展的核心研究内容之一。安全控制信息和用户业务信息是自组织网络最主要的两类信息,而两者不同的服务质量(QoS)需求对MAC机制的设计带来了严峻的考验。该文主要考虑车联网和无人机自组网,针对其网络特征,从不同的优化目标出发,对其使用的MAC协议进行分析与归纳,并对下一步的研究方向进行了思考与展望。

关键词: 媒体接入控制协议; 移动自组织网络; 多无人系统; 优化性能

中图分类号: TN919.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)03-0790-13

DOI: 10.11999/JEIT210819

Overview on Medium Access Control Protocol in Flying Ad-hoc NETWORKS and Vehicular Ad-hoc NETWORKS

DONG Chao^① TAO Ting^① FENG Simeng^① QU Yuben^②

LIU Qingxin^① WU Yulei^① ZHANG Min^①

^①(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

^②(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the iterative update of mobile communication technology, Vehicular Ad-hoc NETWORKS (VANETs) and Flying Ad-hoc NETWORKS (FANETs) have become significant parts of the communication network, and the Medium Access Control (MAC) protocol is one of the core research contents of the future development of Mobile Ad-hoc NETWORKS (MANETs). Security control and user service are the two principal types of message in Ad-hoc networks, where their different Quality of Service (QoS) requirements bring severe challenges to the design of MAC mechanism. In this paper, VANETs and FANETs are mainly taken into consideration. According to their network characteristics and different optimization objectives, the MAC protocols used in them are analyze and summarized, while the future research directions are discussed and prospected.

Key words: Medium Access Control (MAC) protocol; Mobile ad-hoc network; Multi unmanned system; Optimal performance

1 引言

近年来,陆、海、空以及航天领域对移动通信网络系统的需求与日俱增。随着人工智能技术以及智能控制理论研究的不断发展,与新型移动自组织网络相关的研究日新月异。基于“制造强国”的战略目标,移动通信网络已成为社会重点研究对象,

而其中的媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)协议问题无疑是未来自组织网络发展的核心研究内容之一。

现如今,新型移动通信网络正朝着多元化、综合化、智能化的方向发展。在传统的移动通信网络中,主要依靠基础设施的建设来维持通信系统的部署及运营,这样做既增加了运行成本,又浪费了相关的人力资源,并且网络性能优化效果也不甚理想。因此,新型移动自组织网络则成了如今和未来网络发展必不可少的一项关键技术。新型移动自组织网络的用户终端可以在网内随意移动而保持通信,例如地面车辆、无人机、舰船、无人传感器

收稿日期: 2021-08-12; 改回日期: 2021-12-23; 网络出版: 2022-01-13

*通信作者: 陶婷 taoting@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61931011, 62001219)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61931011, 62001219)

等，这使得它不仅能够在现代作战场景中执行情报侦察、战场监视、目标指示等任务，作为未来作战和攻防的主力；而且在日常生活中的精准农业^[1]、网络覆盖^[2]、目标跟踪^[3]等方面均大显身手。目前各国均很重视新型移动通信网络的开发、试验等，将其列为面向未来的重要装备之一。

其核心之一的MAC协议控制着网络中的资源分配、介入和调度，MAC协议设计的好坏往往决定着网络性能高低，因此设计合理的MAC协议显得尤为重要。在真实应用场景中，往往存在着传输冲突以及信道资源分配不公平等问题。此外，由于信道受外界环境因素影响较大，信道不稳定的情况时有发生，甚至会出现通信链路突然中断等情况，因此移动网络比起固定网络来说更容易受到安全威胁。考虑到种种因素的影响，对移动自组织网络MAC协议的设计任重道远。通常MAC协议的设计和构建需要遵从以下6个原则。

(1)低时延原则。时延不仅决定了数据发送的时效性，而且极大地影响节点传输和工作的效率。从用户角度来说，时延是指1个报文或分组从一个网络的一端传送到另一端所需要的时间，它包括了发送时延、传播时延、处理时延和排队时延。MAC协议控制节点接入信道的方式，决定了数据发送和转发的时间，因此MAC协议应当充分考虑到时延对网络通信性能的影响，从而合理地设计时隙宽度。

(2)高吞吐量原则。吞吐量是衡量通信网络性能的常用有效指标之一。MAC协议决定信道资源的分配和调度，合理的信道资源分配是网络节点建立可靠的通信前提，也是实现信道资源利用最大化的重要保障。当信道资源满负荷使用时，网络的吞吐量便能得到有效提高，高效的时隙预约和合理的时隙分配机制则必不可少。

(3)低功耗原则。在新型移动自组织网络的网络环境中，通常是靠独立电池供能来维持节点的正常运转。由于独立电池的电量有限，且在电量耗净

前难以进行及时更换回收，所以在实际情况下对节点的功耗有一定的要求。另外消息的频发也会增加功耗，因此高效的时隙分配算法和时间同步算法至关重要。

(4)低丢包率原则。通信链路频繁的改变，会导致较高的网络丢包率。如若信息发送不成功，则会导致重传，进而使得网络延迟增大，影响整个通信网络的性能。作为导致丢包最突出的重要因素便是网络拓扑的动态变化和信道干扰问题，因此MAC协议设计时往往需要考虑一种高频邻居发现策略，邻居列表需要随着网络结构的变化不断更新，保持列表的实时性，从而降低整个通信网络的丢包率。

(5)信道接入优先性原则。在实际的移动自组织网络中，通常存在某些节点需要承担更多特殊或重要的业务，这类节点往往需要更多的信道资源，以便于整个通信网络的管理和协调。所以在设计MAC协议时，应该给予这些节点优先使用信道的权力，或者为此类节点预留更多的时隙数量等。

(6)网络拓扑变化原则。在移动自组织网络中，节点的访问或退出是频繁发生的，因此网络拓扑时常处于高度动态变化之中。当网络节点退出较多时，空闲信道应尽可能分配给其他在线节点；当网络接入多个新节点时，则有可能会面临网络拥塞引起的信道冲突问题。因此，在MAC协议的设计中应充分考虑网络拓扑结构的动态变化。

MAC协议主要分类方式见表1。

相较于传统网络，新型移动自组织网络能够快速部署独立的通信网络或者有效地延伸已有的通信网络的覆盖范围，做到自发现、自组织、自配置等，具有良好的应用前景。在这其中，最突出的两个应用为车载自组织网络(Vehicular Ad-hoc Networks, VANET, 简称车联网)和无人机自组织网络(Flying Ad-hoc Networks, FANET, 简称无人机自组网)。

于2003年举办的国际电信联盟电信标准分局

表1 MAC协议分类

分类方式	类型	特点
分配信道方式	基于竞争类	按需使用信道，适用于上层数据较少且节点个数较少的场景
	基于预留类	通过协议本身的调度保证节点可以公平有序地使用频谱资源
	混合类	竞争类&预留类，兼顾两者
信道使用数目	单信道	所有的安全控制信息和用户业务信息在同一个信道上发送和接收
	双信道	有两个共享信道：控制信道和业务信道
	多信道	节点可以在多个信道上发送和接收
网络控制类型	集中式	存在中心节点，业务集中处理
	分布式	不存在中心节点，通信控制功能分布在各个节点上

(International Telecommunication Union- Telecommunication standardization sector, ITU-T)汽车通信标准化会议, 提出了车载自组织网络的相关概念。各国专家首次将移动自组织网络(Mobile Ad hoc NETwork, MANET)技术引入车载通信系统, 提出了VANET。时至今日, 电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)已推出了VANET的相关协议标准IEEE 802.11p^[4]和IEEE 1609^[5-8]。而无人机自组网目前仍处于研究发展阶段, 因此并没有相应的标准, 需要不断地进行研究探讨。

作为自组织网络突出的重要应用之一, 车联网现如今被广泛应用于日常生活当中。车联网融合了全双工通信、大规模天线阵列等技术, 具有低时延、高可靠以及高效的频谱资源利用等特点, 以完成车、人、互联网间的信息共享; 无人机由于其体积小、成本低、不易被发现、便于部署等优势, 在现在乃至未来都将发挥重大作用, 不仅仅是民用领域的实时监控、自动跟踪、搜寻与救援等, 在军用领域也举足轻重, 用于实地侦察、精准打击, 甚至能够保障作战人员的安全。

目前已有许多针对移动通信技术相关研究的综述, 但对于车联网和无人机自组网的MAC协议性能的分类总结仍尚有不足之处。文献[9]主要总结了蜂窝系统和无人机技术之间的集成协同效应, 并通过进行现场试验判断不同设计方案的优劣及可行性分析。文献[10]针对异构网络的移动管理, 从功耗、安全性和延时3个方面对其进行了综述。文献[11]从环境条件、应用需求和资源可用性3个角度, 对自组织网络的MAC协议进行分类, 并对其可编程性水平进行总结。文献[12]从保证安全控制与用户业务需求入手, 详细总结了基于IEEE 1069.4信道架构标准衍生的车联网多信道MAC协议。文献[13]概述了3GPP 第5代移动通信(5th-Generation mobile networks, 5G)网络的网络架构和安全功能, 重点介绍了新的功能和技术, 包括车辆到一切通信等。文献[14]对第3代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)标准支持车辆通信所涉及的系统架构方面进行了严格而详细的审查, 并从研究和标准化的角度, 表明3GPP在自组织通信网络现在乃至未来发展中的重要作用。

与上述综述文章不同, 本文主要针对现代移动通信技术下基于移动自组织网络的MAC协议, 以车联网和无人机自组网为例, 研究并整理了不同的MAC协议对于网络通信性能的影响。本文主要贡献如下: 第一, 对于现代移动通信网络下, 针对车

联网和无人机自组网的场景研究, 从系统架构及网络特征等方面进行相关介绍; 第二, 对两个网络场景下不同的MAC协议进行了分类与归纳, 总结了不同的性能指标对自组织网络通信性能的影响; 第三, 针对现代移动通信技术的局限性进行分析, 并对移动通信MAC协议的未來研究提出了相关技术挑战。

2 车联网和无人机自组网的结构分析

第5代移动通信技术定义了3大技术场景, 包括增强型移动互联网(Enhanced Mobile BroadBand, EMBB)、海量机器类通信(Massive Machine Type of Communication, MMTTC)以及高可靠低时延通信(Ultra Reliable & Low Latency Communication, URLLC)。其中URLLC 主要表现为满足端到端毫秒级的低时延性能^[15,16], 车联网^[17]是5G通信系统高可靠低时延通信场景的重要应用之一。

如图1所示, 将车联网的组网结构进行划分, 即车际网、车内网以及车载移动互联网3个主要模块。其中, 车际网的通信考虑的是车辆与车辆之间的通信, 即车辆间端到端的信息交互; 车内网的通信考虑的是车辆与行人之间的通信, 即通过内置的车载单元(On-Board Unit, OBU)与移动终端进行通信, 行人可以实时了解到环境中交通信息的变化情况; 在车载移动互联网中, 基站充当中继的功能, 为车辆与互联网之间的无线通信和信息交换提供服务, 实现全网无缝连接。

与传统的移动自组织网络相比, 车联网融合了认知无线电(Cognitive Radio, CR)、大规模天线阵列、全双工通信、超密集组网等技术, 具有更低的时延, 更高的可靠性, 以及高效的频谱和能源利用。但它作为移动自组织网络的一种特殊应用, 也具有其独特的特点。首先, 车联网的网络规模很大, 且节点数量较多; 其次, 车辆节点一般受公路

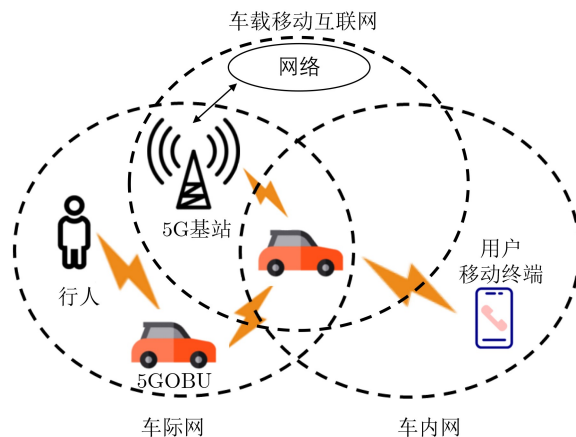


图1 车联网结构示意图

约束，移动速度较快；然后，车辆受能源限制影响较大，一般由车载电池或独立电池供电；最后，为了避免碰撞和事故，车辆节点之间需要传输可靠的安全信息，因此对保障信息传输的能力以及信息时效性有更高的要求^[18]。

随着移动互联网的发展，越来越多的设备将接入到移动网络中，且新的服务和应用层出不穷，移动数据流量将会迎来井喷式的暴涨，这会给未来的移动通信带来严峻的考验与挑战。因此，满足日益增长的移动流量需求，亟需发展第6代移动通信技术(6th-Generation mobile networks, 6G)。

航空6G是指以无人机等空中平台为纽带的6G网络，涵盖以空为核心的空天、空空、空地通信、组网及其应用，其特征包括全覆盖、全频谱和全应用^[19]。它会尝试将卫星通信、平流层通信与地面蜂窝状通信技术相融合，使覆盖没有盲区。与5G相比，航空6G的特征超出了传统移动通信的概念，将与人工智能^[20]、区块链^[21,22]、移动边缘计算^[23]融合到一起。由此可见，以无人机为代表的各类空中平台在航空6G中具有重要作用，针对无人机自组网MAC通信协议的研究很有意义。

无人机自组网的构架如图2所示。其中，移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)无人机代表携带移动边缘计算服务器的无人机，用于辅助用户无人机进行计算任务，用户无人机在规定区域中移动以覆盖任务点，其计算任务可以卸载到边缘计算无人机上进行计算，也可以卸载到簇头无人机上进行计算。FANETs往往存在多个簇头无人机能协调网络中所有用户无人机的通信，这种组网方式在多无人机的系统中广泛应用；与此同时，无人机覆盖范围内的各种节点，包括地面车、移动用户、基站等，能够相互转发指控指令，交换感知态势、

健康情况和情报搜集等数据，并与无人机一同构成空、天、地一体化的无人机组网结构，以满足未来通信网络更高效、更稳定的通信需求。

无人机自组网与车联网(表2)相比，其网络规模更大，节点的移动性更强，且在3维空间移动。无人机通常要完成侦察和监测等任务，需要传输图像、视频等多媒体信息^[24]，因此无人系统组网不仅要保障信息安全性、有效性和实时性，还需要提高吞吐量和信道利用率。

在多无人系统的通信中，传输的消息包括两类：安全控制类信息和用户业务类信息^[25]。其中，安全控制类信息包括节点速度、位置和节点碰撞故障等信息，通常以广播的形式传输给网络中的所有邻居节点或者全部节点，此类信息对于网络的延迟性能和可靠性有着严格的要求。用户业务类信息主要涉及图像、视频等多媒体业务信息，通常采用单播的形式进行点对点的传输。相比较于安全控制类信息，用户业务信息一般要求较高的网络吞吐量，对信道利用率有一定的要求，但对于时延、可靠性有一定的容忍能力。如何保证两类信息不同的服务质量(Quality of Service, QoS)需求，对MAC协议的设计带来了严峻的考验，也是多无人系统能否成功且高效应用的关键。

3 面向车联网的MAC协议研究

目前VANET正在与蜂窝网络融合，涌现出了基于全球统一规定的体系架构及其通信协议和数据交互标准制定的车辆的长期演变(Long Term Evolution-Vehicle, LTE-V)技术的车联网方案，并向着5G车对一切外界信息进行互联(Vehicle to Everything, V2X)的方向演进^[26]。VANET研究的主要目标是保障业务传输的时效性与可靠性：如果

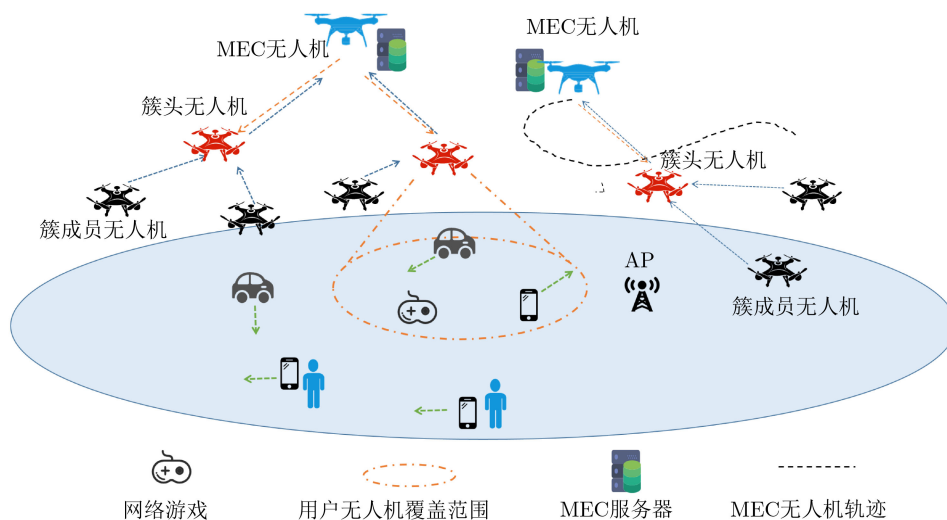


图2 无人机自组网结构示意图

时效性过低, 时延过大, 则会导致信息传达过于缓慢, 用户体验极差; 如果可靠性不强, 则会导致信息传达不准确或无法传递, 对后续一系列的行为或判断造成不可预估的影响。其次, 信道利用率对于车联网的MAC协议研究来说也很重要。目前, 车联网MAC协议根据优化目标的不同通常可分为表3中的两类。

3.1 低时延高可靠

MAC层端到端的时延是指一条道路安全消息在MAC层端到端进行传输所需要的时间, 从在发射端由高层协议递交给MAC层开始计算, 终止于接收端的MAC层把这条消息递交给上层协议。可靠性反映为对安全控制类消息的性能保障能力。

基于时分多址的MAC协议提供了一个很有前途的解决方案, 很好地支持车辆自组织网络中对延迟敏感的安全应用, 因为时隙接入方案确保传输在超低延迟内。然而, 由于车辆之间的移动性会导致拓扑结构的快速变化^[27], 频繁地断开连接会导致碰撞和数据包丢失等各种问题, 从而导致通信不稳定^[28]。文献[29]提出了一种移动感知的机动性感知与避碰媒体接入控制(Mobility-aware and collision-avoidance MAC, MoMAC)协议, 它可以根据道路拓扑结构和车道分布情况, 并考虑车辆的移动性, 为每辆车分配一个时间段。在MoMAC中, 同一路段的不同车道和十字路口的不同路段都存在不相交的时隙集。此外, 每辆车还会广播安全信息以及邻近车辆的占位信息; 通过更新由单跳邻居间接获取的两跳邻居占用时隙信息, 车辆可以检测时隙冲突, 并以完全分布式的方式访问空闲时隙。与基于时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的MAC协议相比, 该方法的传输碰撞减少了近1/2, 安全信息的传输/接收率大大提高。

为了使网络拓扑相对稳定, 文献[30]提出了一种基于簇的无冲突多通道媒体接入控制协议

(Clustering-based Collision-Free Multi-channel MAC, CCFM-MAC), 簇头可以管理簇内的资源。考虑到簇内和簇间的消息冲突问题, 文献[30]提出两点想法: (1)在相邻的簇间分配不同的频带, 以避免集群间的干扰; (2)通信资源必须由簇头统一分配给集群成员。该协议在平均端到端延迟和成功传输概率方面均有很大的优势。

上述几种方法均是基于网络拓扑结构对于车联网MAC协议进行时延和可靠性的优化。不同于上述方法, 文献[31]提出了基于流量信息避免消息冲突的MAC协议。在车辆密度较高的情况下, 如果车辆采用固定的传输周期, 则很可能出现严重的信道阻塞和信息传输冲突。为了缓解信道拥塞, 该协议研究了一种全分布的信标拥塞控制方案, 以保证每辆车主动适应一个最小但足够的信标率。通过大量的实验模拟, 该设计在不同交通密度和各种基础道路拓扑结构中的效率得以验证。

协同通信可以通过降低车载移动对无线信道的影响来提高通信链路的可靠性, 从而提高通信速率, 降低时延, 缓解移动车辆造成的无线信道损耗。文献[32]提出了一种适用于VANETs的新型可靠、高效协同媒体接入控制协议(Reliable and Efficient Cooperative MAC, RECV-MAC)。该方法引入了新的控制消息来支持协作通信, 并兼容了IEEE 802.11p所采用的随机访问方法, 即避免冲突的载波侦听多址访问。为了研究RECV-MAC协议的性能, 基于马尔可夫链模型的分析方法被采用, 验证了RECV-MAC协议的有效性, 表明RECV-MAC协议在提高吞吐量的情况下提高了性能, 通过降低数据包丢弃率提高了通信的可靠性, 并降低了延迟, 特别是满足100 ms的延迟约束。

然而, RECV-MAC协议只适用于流量较低的车联网场景下。在高流量场景下, RECV-MAC协议的性能相对较低。在此基础之上, 文献[33]提出

表2 车联网和无人机自组网特点对比

特征	车联网	无人机自组网
网络规模	大, 主要限制在地面活动	更大, 在3维空间移动
移动性	快, 通常在6~30 m/s, 受道路约束大	高速, 通常在0~130 m/s
能源限制	由车载电池或者独立电池供电	无人机电量很受限, 电量会影响载重和续航时间
应用场景	交通和天气信息, 警报和位置服务, 信息娱乐系统等	救援行动, 农作物调查, 野生生物搜索, 救灾应急等

表3 根据优化目标对车联网的MAC协议进行分类

优化目标	参考文献	特点
低时延高可靠	文献[29-33]	综合考虑时延和丢包率, 针对不同的目标, MAC协议的侧重点不同
高信道利用率	文献[34-39, 43, 44]	在以时延和丢包率为约束的条件下, MAC协议的主要目标为提高信道利用率

了一种新的基于正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)的高效协同MAC(OFDMA based Efficient Cooperative MAC, OEC-MAC)协议。该协议提供了副载波信道分配和访问机制,并通过定义新的控制消息来支持协作通信。通过基于马尔可夫链模型的分析,OEC-MAC协议在保证吞吐量显著提高的同时,也满足VANETs安全消息中的严格延迟要求。此外,还通过降低丢包率来提高通信的可靠性。

3.2 高信道利用率

在现实生活中,车联网不仅仅需要考虑传输信息的时延问题以及可靠性问题,也需要将网络信道利用率纳入考虑范围。在大规模车载网络中,信道利用也是协议设计的一大挑战。信道利用率的主要表现为网络吞吐量,当信息传输速率保持不变时,网络吞吐量越大,信道利用率越高。

文献[34]提出了一种自适应的高吞吐量多通道MAC协议,即自适应高吞吐量媒体接入控制(Adaptive High-Throughput MAC, AHT-MAC)协议,以支持车联网在业务信道上的数据传输。使用AHT-MAC,数据传输范围根据控制信道(Control Channel, CCH)上信标传输范围进行调整,以便发送节点可以确定适当的通信候选节点,并在传输前为两个通信节点准备可用资源。此外,通信协调是通过双向握手进行的。在握手过程中,根据提出的资源共享机制实现自适应资源保留,节点首先尽可能多地利用资源,然后主动与他人共享资源。为了提高通信握手的成功率,提出了一种请求冲突解决机制来消除不恰当的握手。因此,AHT-MAC可以减少由于握手失败和重新传输请求的额外开销而造成的资源浪费,提高吞吐量,以此来提高信道利用率。

文献[35]提出了一种新颖的时隙共享MAC(time Slot-Sharing MAC, SS-MAC)协议。该方法引入了一个循环记录队列来在线感知时隙的占用状态,然后设计了一种分布式时隙共享(Distributed Time Slot Sharing, DTSS)方法,以有效地共享特定的时隙。此外,该协议还开发了随机指标优先拟合(Random Index First Fit, RIFF)算法,以帮助车辆选择合适的时间段进行共享,使信道利用率最大化。

未来的车载通信系统必须提供车际通信以确保行车安全,向相邻车辆发送安全信息是一项关键策略。文献[36]提出了一种新的帧结构,并在此基础上设计了一种高效的报文广播MAC协议,该协议允许信标报文和应急报文共享信道,从而节省带宽资源。该协议通过区分这两类消息的优先级和设置

信道资源抢占机制,大大降低了消息冲突概率,在满足延迟要求的基础上,大大提升了信道利用率。但是,在大规模网络中,由于时隙数量有限,应用该协议时,系统容量成为主要限制因素。

一种基于竞争强度的分布式协调(Contention Intensity based Distributed Coordination, CIDC)安全消息广播方案在文献[37]中被提及。CIDC的应用层设计充分利用了安全消息广播的高频和周期性特点,使每辆车都能以完全分布式的方式估计瞬时信道竞争强度。根据竞争强度信息,CIDC的MAC层设计允许车辆采用比802.11p更好的通道访问策略,从而提高吞吐量和信道利用率。但是,该文献并没有考虑到协同传输这种情况。协同传输有两种方式:当中继节点处于松弛状态时,其他节点仅在其缓冲区空闲时协助传递消息;当中继节点处于忙碌状态时,其他节点将在缓冲区空闲时协同传递消息。

基于此,文献[38]针对车载自组织网络,提出了一种基于增强型TDMA、用于车联网的协作MAC协议(Enhanced TDMA based Cooperative MAC protocol for Vehicular networks, EVC-TDMA),该协议有助于多模式协同传输。在EVC-TDMA中,当车辆需要传输多个消息时,根据相对速度和缓冲区长度动态选择中继节点。通过监控广播消息,其他节点可以知道中继节点的缓冲区长度,当缓冲区空闲或更少时,它们将帮助中继节点传输消息。在车辆速度相对稳定的情况下,EVC-TDMA网络性能良好,极大地提高了信道利用率。

车联网一般采用广播来进行信息的传输,但是一般来说,相比于单播,广播被认为是不太可靠的一种传播方式。文献[39]介绍了一种新型的无线广播协议,称为混合协作无线广播协议,它利用信道化的概念,大大提高了车载网络广播的可靠性。该协议引入了一种混合协议,它结合了时分多址的时隙分配和载波侦听多址(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)^[40]的随机存取技术,从而使数据碰撞^[41,42]的概率最小化。此外,它的反馈策略通过防止在发生碰撞的时隙中传输,进一步提高了车联网信道利用率,为信息传输提供了更快的信道访问。

与上述协议类似,基于位图的混合媒体接入控制(Bitmap based Hybrid Medium Access Control, BH-MAC)协议^[43]也是通过减少冲突的方法,提供更快的信道访问速度,提高吞吐量,以达到提高信道利用率的效果。BH-MAC,即基于一种采用TDMA的VANETs可靠广播MAC(a TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs,

VeMAC)协议的位图混合媒体接入控制协议,通过使用固定大小的位图来表示槽发送请求(Request-To-Send, RTS)位的状态来减少数据包开销。它采用载波侦听多址机制来保留TDMA插槽以减少访问冲突。此外, BH-MAC还提出了一种检测传输碰撞误差的新方法。与VeMAC相比, BH-MAC减少了访问冲突,提供了更快的通道访问,并提高了吞吐量。

在车联网中,基于时分多址的覆盖协议也可以防止传输冲突,在提供有效的通信信道方面起着重要的作用。然而,由于车辆的高机动性和时变的交通流,现有的基于TDMA的槽位分配方法不能充分利用信道资源,可能导致信道利用率极低。为了克服这些缺点,文献[44]提出了一种基于TDMA的流量感知MAC(Traffic-Aware TDMA MAC, TA-MAC)协议,该协议利用了移动边缘计算的能力。首先,基于MEC和车辆到路侧单元(Vehicle to Road, V2R)通信,提出了一种交通感知机制来估计路段上的交通状况。其次在此基础上,提出了一种新的信道分配方法,以保证动态流量条件下的高信道利用率。

3.3 分析和总结

根据车联网相关研究场景架构中是否需要路边单元(Road Side Unit, RSU)的辅助,将车联网MAC协议进行如下分类,具体见表4。

从表4可以看出,目前的主要工作集中在需要RSU进行辅助的车联网场景架构下,关于不需要RSU辅助的车联网MAC协议的相关研究较少。总的来看,带RSU的协议的共同特点是,RSU可以作为网络中的一个中心节点来执行协调与调度工作,直接与车联网中的所有节点进行通信,收集车联网内信息,基于此动态调节安全信道间隔和业务信道间隔长度,因此需要RSU进行辅助的车联网MAC协议往往能够动态适应流量变化,提高车联网的性能。相比之下,不带RSU的协议的安全信道间隔和业务信道间隔都是固定的,其中EVC-TDMA通过动态选择中继节点的方法,广播缓冲区长度进行协同传输,从而提高网络性能;TDCSMA则通过区分消息优先权采用信道资源抢占机制,在满足延迟要求的基础上通过提高信道利用率来提高网络性能。

表4 根据是否需要RSU辅助对车联网MAC协议进行分类

RSU辅助	参考文献
需要	文献[29-35,39,43,44]
不需要	文献[36-38]

总的来看,相对无RSU辅助的MAC协议,具有RSU辅助的车联网MAC协议具有较好的性能优势,且易于实现不需要额外的开销,但基站等RSU基础设施的建设增加了车联网的构建成本,也限制了其应用环境。而不带RSU辅助的车载自组织网络建设成本和运营成本都很低,且更加容易布设,组网更加方便,但其需要额外的开销以支持其分布式结构,并且就如何解决同时保障安全控制信息与用户业务信息不同QoS要求的问题存在更加严峻的挑战。

4 面向无人机自组网的MAC协议研究

无人机这一终端的兴起,尤其是无人机通信的迅猛发展,引起了国内外研究组织的广泛关注。3GPP标准于2017年开始研究无人机,2018年启动针对R16的无人机通信的讨论,研究5G网络如何更好地支持无人机终端,探讨如何最大效率地复用地面网络为空中无人机提供通信、如何为无人机通信划分频段资源或者专用网络等。

4.1 无人机自组网MAC协议性能分析

与车联网不同,无人机自组网由于具有部署容易、灵活性强和应用范围广等优点,常常会被应用于监视和监控^[45]、救灾应急^[46]、航空摄影^[47]、搜救^[48]等方面,因此对于安全信息和业务信息的传输具有更高的要求。

时延敏感型目标对信息传输的时效性和可靠性有严格的要求,而为该应用设计的媒体接入控制协议只能在负载很轻的情况下工作,其吞吐量和信道利用率的性能较低。针对这一问题,文献[49]提出了一种基于反馈重传的异步跳频媒体接入(feedback-retransmission based asynchronous Frequency hopping Media Access, FRMA)控制协议。该协议采用了突发通信、异步跳频、信道编码和反馈重传等方法。通过异步跳频机制,实现了即时报文传输任务和多报文接收,提高了实时性。此外,还通过信道编码和反馈重传来实现信息传输可靠性。虽然FRMA控制协议大大提高了系统吞吐量,但随着流量负荷的增加,数据包端到端延迟也在增加,因此,在采用该协议时,流量负荷应根据时效性和可靠性的具体要求加以限制。

无人机通信由于参与网络的节点具有高度的动态性,并且由于不协调的时间、拥挤、碰撞或过高的能源消耗而存在很大的损失问题,因而难以保障组网通信的可靠性和性能。文献[50]利用萤火虫优化算法的特性,提出了一种新的节能和位置感知的媒体接入控制(Energy-efficient and Location-

aware Medium Access Control, ELMAC)协议。该算法构成了一种有效的时隙机制,同时考虑了能量需求和网络中每个无人机的位置,以避免可能导致整个网络失效的瓶颈,提高无人机网络的服务质量。ELMAC能够提供无拥堵、无碰撞和节能的MAC协议,从而在无人机网络中提供可持续的连接,高效的控制以及提供高质量的服务。实验结果表明,EL-MAC在丢包率、平均吞吐量和端到端延迟等方面都具有优势。它还提供了更好的信道利用率,使得无人机自组网的整体性能得到了提升。

文献[51]考虑了地面站具有连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)能力,以提高无人机自组网的信道利用率。该文献关注的重点在于推演出一个无人机与地面站频繁通信的传输时间表,并尽量减少碰撞。在引入一种新的分布式学习媒体接入控制(distributed Learning Medium Access Control, LMAC)协议之前,本文首先提出了一个随机优化问题,使得无人机能够在给定的调度长度下学习最佳的传输时隙和相应的方向,从而获得最高的解码成功率。实验结果表明,LMAC的平均数据速率至少是参考协议的两倍,大大提高了信道的利用率。

考虑到多无人系统任务的多样性和应用场景的多样性,自适应MAC协议^[28]应运而生。文献[52]提出的容错(Fault-tolerant Synchronous-MAC, FS-MAC)协议可以在故障无人机的TDMA和CSMA/CA之间同步切换合适的MAC协议。在FS-MAC中,提出了分布式基于Q学习的切换方案来处理切换决策。首先,单个无人机使用MAC预选操作来确定合适的MAC协议。其次,利用提出的基于实用拜占庭容错(Practical Byzantine Fault Tolerance, PBFT)的共识决策过程,实现了多架无人机之间的同步切换协议。采用FS-MAC协议,平均吞吐量、延迟和分组重传率的性能都得到了改善。

文献[53]提出了一种基于自适应载波侦听多址的FANET群集MAC(Self-Adaptive MAC Protocol for Flocking of Flying Ad-hoc Network, FMAC)协议,以在密度变化的群集场景下提供可靠的广播信息服务。在FMAC协议中定义了群体邻域势(Collective Neighboring Potential, CNP)来表示无人机聚集过程中密度的变化趋势。在每个周期开始时,每个UAV计算当前CNP基于可用邻居的运动状态;然后,利用无人机的动力学方程,对相同邻域下一周期初的CNP值进行预测;之后,每个无人机都可以通过比较当前的竞争窗口和预测的竞争窗口来更新竞争窗口的大小,如果当前的竞争

窗口比预测的竞争窗口大(小)一段时间,竞争窗口的大小就会减少(增加)。仿真结果表明,FMAC协议在密度变化的群集情况下能够保证较高的成功传输概率,其吞吐量优于典型的MAC方案,有效提高了信道利用率。

近年来,多通道MAC协议被证明是支持不同QoS的有效协议。文献[54]提出了FANETs多通道MAC(FANETs Multi-channel MAC, FM-MAC)协议,它结合了多通道天线和定向天线的优点,以提供不同的QoS保证,并在一定程度上有效地解决了链路中断的问题。首先,针对无人机高机动性带来的链路中断问题,该协议提出了一种基于移动预测的预约方案。其次,FM-MAC提出了一种抢占机制,为业务信息提供优先级。通过仿真结果表明,FM-MAC对安全控制信息可以实现低延迟和高分组传输率,对用户业务信息也可以实现高吞吐量。

文献[55]所提出的协议也是一种多通道负载感知(Multi-Channel Load Awareness, MCLA)MAC协议,与FM-MAC不同的是,该协议是一种基于负载感知的分布式随机竞争的MAC协议。MCLA协议主要由多优先级排队与服务机制、分组准入控制机制、信道占用统计与预测机制、退让机制和多信道分配机制5个部分组成,利用多类排队理论对多优先级排队和服务机制进行了进一步的建模,并利用马尔可夫链模型对退避机制进行了建模。MCLA根据信道的实时状态控制数据包对信道的访问,并根据网络中活动节点的数量调整回退持续时间,因此在高负载条件下优于传统的MAC协议,具有卓越的性能优势。

文献[56]提出了一种用于飞行自组织网络中反向阵列天线开发的多信道媒体接入控制协议(Multi-Channel MAC Protocol With Retrodirective Array Antennas in Flying Ad Hoc Networks, FA-MMAC)。FA-MMAC利用信道的特性增加了信道的空间复用能力,其核心思想是无人机在数据窗口交换数据包之前,在控制窗口交换控制包,选择数据通道并对齐波束,以减少隐形终端和耳聋问题。无人机可以通过控制帧的循环定向传输来保留信道和对齐波束,因此该协议可以利用空间重用的反向阵列天线的优点和增加的覆盖范围,而无须事先知道位置。与全向天线相比,在相同的传输距离下,反向阵列天线所需的功率较小,可以有效地节省功耗。另外,通过控制帧和数据帧的定向传输,可以大大提高节点的通信范围和网络的空间复用性,提供了更好性能的网络聚合吞吐量和分组传送率。

此外, 还有一些工作如文献[56,57]关注了多个同频节点同时有数据发送时的信道资源争用问题。文献[57]提出了PPMAC, 该协议结合了定向天线和位置预测, 克服了定向天线的耳聋问题; 为解决多个无人机和地面基站之间的有效通信, 文献[58]提出一种用于长距离无人机通信的基于传播延迟感知的MAC协议LDMAC, 但是它需要地面站参与控制。可以看出, 现有的工作虽然对无人机自组网的MAC协议进行了一些探索, 但对于协议的自主性考虑的还不太充分。

上述无人机自组网MAC协议的特点性能分析见表5。

4.2 分析与总结

本节将对部分无人机自组网的MAC协议从性能优化目标方面进行对比分析, 见表6。

可以明显看出, 目前的无人机自组网在研究的过程中大多会针对安全控制类和用户业务类信息同时进行研究, 但往往只能较好地保障一方的性能, 例如FM-MAC协议的吞吐量和信道利用率较高, 但它的时延相对于其他协议来说也比较高; MCLA-MAC协议的时延较低, 但其吞吐量也比其他协议要低得多。可见, 想要同时保障无人机自组网的时延和吞吐量, 仍需要对其MAC协议进行改进研究。

表5 无人机自组网的MAC协议特性整理

协议	特点	缺点	实验场景
高吞吐量原则	FRMA控制协议 ^[49] (1)可以实现即时报文传输任务和多报文接收, 提高了实时性; (2)采用反馈重传机制, 吞吐量得到了有效提高。	(1)采用反馈重传机制增加了端到端的时延; (2)流量负荷需根据时效性和可靠性的具体要求进行限制, 不能做到自主化。	模拟空对地的攻击任务, 分4组共40架无人机完成对地面目标的打击; 任意两组之间的距离均大于2 km; 集群之间可以进行信息传递。
低功耗原则 低丢包率原则	ELMAC协议 ^[50] (1)基于萤火虫优化方案提供可靠的QoS指标; (2)设计了有效的避碰、拥塞控制和节能算法。	在MAC层捕获, 耳聋问题并未得到解决。	由5~20架无人机构成无人机自组网, 通过全向天线进行通信;
低丢包率原则 高吞吐量原则	LMAC协议 ^[51] (1)无人机可以通过学习最佳传输策略以确定最佳时隙和天线方向; (2)克服了由于无人机的移动性引起的随机信道增益问题。	(1)该协议需要地面基站进行辅助控制来消除干扰, 场景限制较大; (2)对于传输功率控制和数据速率的研究不足。	由20架无人机构成无人机自组网, 地面站与无人机的距离为20~400 m。
高吞吐量原则	FS-MAC协议 ^[28] (1)具有容错同步交换MAC协议功能; (2)在考虑故障的无人机的情况下, 实现多无人机之间的同步切换一致性。	(1)条件限制太多, 无法进行大规模的实验模拟; (2)未考虑其他无人机自组网突发真实实验情况, 如协议切换失败如何处理。	均匀分布在球体空间的5~12架无人机组成的中小型无人机自组网结构, 无人机之间均可以相互通信。
低功耗原则 低丢包率原则	FMAC协议 ^[52] (1)以较低的成本在密度变化的集群场景实现较高的可靠性; (2)在接收到数据包有限的情况下也可以调整竞争窗口的大小, 避免信道恶化。	(1)无法实时调节更新竞争窗口的间隔长度和大小; (2)对于周期性单跳数据包的传输, 无人机集群的飞行环境过于简单。	自由空间中的蜂拥, 无人机群密度会变密, 且存在4个圆形障碍物; 每架无人机从移动的虚拟中心获取信息。
低功耗原则 低丢包率原则	FM-MAC协议 ^[53] (1)将多信道与定向天线结合以提供不同的QoS保障; (2)针对链路中断问题, 提供了基于移动预测的信道预约方案。	固定长度的控制信道间隔和业务信道间隔无法根据不同分组的流量需求调整, 不利于动态的网络环境。	所有无人机均配备相同的天线和无线电以进行通信; 天线可以工作在全向模式或定向模式。
信道接入优先性原则	MCLA协议 ^[54] (1)支持多个业务类, 并保障最高优先级业务的极低时延和极高传输速率; (2)采用自适应退避算法, 灵活调节竞争窗口; (2)根据信道的忙闲程度, 控制业务信息对信道的访问。	(1)并未详细阐述其他不同优先级的业务如何保障QoS; (2)该文假设过多, 无法在真实场景中完美应用。	无人机随机分布在空间中, 以随机方向进行匀速线性运动。
低功耗原则 高吞吐量原则	FA-MMAC协议 ^[55] (1)通过子信道的划分和多波束的复用, 从空间和频域分配资源; (2)解决了定向传输、隐藏终端和耳聋等干扰问题; (3)无人机之间的并行传输能力得到了提升。	(1)该协议对于波束的切换问题研究较少, 需要进行改进以减少无人机移动性带来的影响; (2)假设情况下物理信道中误码率为0, 且不存在传输延迟, 这在现实场景中基本不存在。	由在相同高度飞行的无人机集群组成无人机自组网, 并采用GPS进行同步。

表6 根据优化目标对无人机自组网的MAC协议进行对比分析

	协议	端到端时延(s)	平均吞吐量(Mbps)	传输率PDR(%)	位置感知
集中式	EL-MAC协议	低	较低	超过90	有
	FS-MAC协议	高	高	-	-
分布式	FM-MAC协议	较高	较高	近100	有
	MCLA协议	较低	低	-	-

总体来说,无人机自组网作为一种新兴的移动自组网网络,它与车联网在某些方面有很多相似之处,因此无人机自组网的MAC协议往往会在一定程度上借鉴车联网的MAC协议。但车联网的MAC协议并不能直接应用于无人机自组网,首先是因为无人机自组网并没有基础设施的辅助,而车联网在很大程度上需要基站等路边单元的辅助;其次,无人机的移动速度一般要比车辆快得多,且在3维空间内自由移动,因此其网络拓扑结构的变化更加复杂,相比较而言,车联网的移动轨迹顺延道路方向,有迹可循,其拓扑变化有一定的条件限制和规律。

无人机自组网目前来说还处于发展阶段,在未来航空6G的构建中占据重要地位。航空6G通信网络中拥有超海量的异构无线网络接入节点,这些网络节点形态各异、距离不定、功率不一^[59],均给未来的通信覆盖方面带来信道挑战。无人机自组网飞行速度快,其依托的航空6G通信时延需要达到微秒级别,通信时延长、可靠性低将会造成无人机远程控制困难,因此对无人机自组网的MAC协议的研究还有待进一步的提高。

5 下一步研究

随着5G的不断普及,通信面向未来的需求会更加明确,尤其重视低时延、大带宽、泛连接等需求。通信技术的发展对于一个国家来说是至关重要的,往往会对与之相连的新应用、新服务渠道以及新材料的制造领域存在极大的促进作用。此外,云计算、大数据等新技术与通信技术也在不断融合,这些迫切需要结合通信最新变化和 network 发展趋势,以更先进的技术推进,即随之而来的航空6G的开发。

本文对现代移动通信网络下的新型移动自组织网络MAC协议进行了整理归纳,主要针对车联网系统和无人机自组网系统,依据不同的优化目标,对现有的MAC协议进行了分类总结,与此同时,就目前工作方法的局限性提出未来研究的技术挑战。

(1)车联网场景的条件限制:考虑到安全类消息和业务类消息的流量需求动态变化,在未来6G

通信时代,车联网需以更加灵活的方式组建和运行。MAC协议需要适应安全控制信息与用户业务信息动态的流量需求,保障安全信息的可靠性,提高业务信息的吞吐量。

(2)车联网网络环境和拓扑结构的多元变化:考虑到道路情况多变,基站等RSU基础设施可能时有时无,车联网需要适应带RSU和无RSU辅助的网络环境,充分利用RSU的优势,避免冲突协调资源,尤其是在无RSU辅助的条件下应主动切换到无RSU的状态,提高网络性能。

(3)无人机自组网能耗与性能的均衡:由于定向天线被广泛应用于无人机网络中以提高通信距离,这些天线即使不是在发射或接收模式下也会消耗大量的能量;此外,当通信设备与GPS和另一个传感器一起使用时,无人机的电池寿命将被减少,这将阻碍无人机的性能和操作。因此,如何既保证无人机的顺利运行,降低能耗,又提高无人机的传输性能,这将是未来的一个研究热点。

(4)无人机自组网的安全性:因为无人机网络便于部署,无人机在军事和民用领域的应用呈指数级增长。但在无人机网络中,往往容易受到各种被动或主动的攻击。因此,维护无人机共享数据的完整性、保密性、私密性和真实性就显得尤为重要。如何设计出能够更好地保障这些要求的MAC协议,尤其在存在无人机节点失效的情况下,在未来显得尤为重要。

(5)无人机自组网的同步连接:随着6G时代的到来,无人机自组网在航空6G的发展中起到了重要的纽带作用。这种网络与其他网络的协作可以使各种应用程序受益。因此在未来,如何研究出有效的MAC协议来支持通过无人机技术实现的异构网络之间的同步连接也是一个非常值得研究的方向。

6 结束语

本文介绍了现代移动通信网络下无人机自组网和车联网MAC机制的研究现状,并对相关工作进行了分类总结,分析了新型移动自组织网络的未来研究趋势和挑战。目前的MAC协议受环境场景的限制较大,并且由于拓扑结构的高度多元变化,如

何提高自组织网络的性能将成为未来的一个巨大挑战。此外,由于通信网络的发展,如何实现异构网络之间的同步连接以满足未来航空6G的需求也是一个严峻的考验。

参 考 文 献

- [1] KATSIGIANNIS P, MISOPOLINOS L, LIAKOPOULOS V, *et al.* An autonomous multi-sensor UAV system for reduced-input precision agriculture applications[C]. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Athens, Greece, 2016: 60–64. doi: [10.1109/MED.2016.7535938](https://doi.org/10.1109/MED.2016.7535938).
- [2] ZENG Yong, ZHANG Rui, and LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36–42. doi: [10.1109/MCOM.2016.7470933](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933).
- [3] LIU Yajun, ZHU Congxu, DENG Xiaoheng, *et al.* UAV-aided urban target tracking system based on edge computing[J]. *arXiv: 1902.00837*, 2020.
- [4] JIANG D and DELGROSSI L. IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments[C]. VTC Spring 2008-IEEE Vehicular Technology Conference, Marina Bay, Singapore, 2008: 2036–2040. doi: [10.1109/VETECS.2008.458](https://doi.org/10.1109/VETECS.2008.458).
- [5] IEEE. IEEE Std 1609.1-2006 IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave)-resource manager[S]. New York, USA: IEEE, 2006: 1–71. doi: [10.1109/IEEESTD.2006.246485](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.246485).
- [6] IEEE. IEEE Std 1609.2-2006 IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments-security services for applications and management messages[S]. New York, USA: IEEE, 2006: 1–105. doi: [10.1109/IEEESTD.2006.243731](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.243731).
- [7] IEEE. IEEE Std 1609.3-2007 IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (WAVE)-networking services[S]. New York, USA: IEEE, 2007: 1–99. doi: [10.1109/IEEESTD.2007.353212](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.353212).
- [8] IEEE. IEEE Std 1609.4-2010 IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE)-multi-channel operation[S]. New York, USA: IEEE, 2011: 1–89. doi: [10.1109/IEEESTD.2011.5712769](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.5712769).
- [9] MISHRA D and NATALIZIO E. A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements[J]. *Computer Networks*, 2020, 182: 107451. doi: [10.1016/j.comnet.2020.107451](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107451).
- [10] GURES E, SHAYEA I, ALHAMMADI A, *et al.* A comprehensive survey on mobility management in 5G heterogeneous networks: Architectures, challenges and solutions[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 195883–195913. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3030762](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030762).
- [11] ISOLANI P H, CLAEYS M, DONATO C, *et al.* A survey on the programmability of wireless MAC protocols[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(2): 1064–1092. doi: [10.1109/COMST.2018.2881761](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2881761).
- [12] 吴国栋, 董超, 李艾静, 等. 车辆自组网多信道MAC机制研究综述[J]. 通信技术, 2018, 51(7): 1491–1496. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.001).
WU Guodong, DONG Chao, LI Aijing, *et al.* Overview on multi-channel MAC mechanisms in vehicle ad hoc network[J]. *Communications Technology*, 2018, 51(7): 1491–1496. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.001).
- [13] CAO Jin, MA Maode, LI Hui, *et al.* A survey on security aspects for 3GPP 5G networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(1): 170–195. doi: [10.1109/COMST.2019.2951818](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2951818).
- [14] GARCIA-ROGER D, GONZÁLEZ E E, MARTÍN-SACRISTÁN D, *et al.* V2X support in 3GPP specifications: From 4G to 5G and beyond[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 190946–190963. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3028621](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028621).
- [15] LI Bin, FEI Zesong, and ZHANG Yan. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 2241–2263. doi: [10.1109/JIOT.2018.2887086](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086).
- [16] POPOVSKI P, TRILLINGSGAARD K F, SIMEONE O, *et al.* 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 55765–55779. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2872781](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781).
- [17] EZE E C, ZHANG Sijing, LIU Enjie, *et al.* Advances in vehicular ad-hoc networks (VANETs): Challenges and roadmap for future development[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2016, 13(1): 1–18. doi: [10.1007/s11633-015-0913-y](https://doi.org/10.1007/s11633-015-0913-y).
- [18] XU Wenchao, ZHOU Haibo, CHENG Nan, *et al.* Internet of vehicles in big data era[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, 5(1): 19–35. doi: [10.1109/JAS.2017.7510736](https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510736).
- [19] 任广山, 常晶, 陈为胜. 无人机系统智能自主控制技术发展现状与展望[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 7–13.
REN Guangshan, CHANG Jing, and CHEN Weisheng. Present and prospect of intelligent autonomous control for UAV[J]. *Control and Information Technology*, 2018(6): 7–13.
- [20] WU Hui, HAN Haiting, WANG Xiao, *et al.* Research on artificial intelligence enhancing internet of things security: A survey[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 153826–153848. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3018170](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018170).
- [21] XIE Junfeng, TANG Helen, HUANG Tao, *et al.* A survey of blockchain technology applied to smart cities: Research

- issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2794–2830. doi: [10.1109/COMST.2019.2899617](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2899617).
- [22] HEWA T, GÜR G, KALLA A, *et al.* The role of blockchain in 6G: Challenges, opportunities and research directions[C]. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), Levi, Finland, 2020: 1–5. doi: [10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083784](https://doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083784).
- [23] ABBAS N, ZHANG Yan, TAHERKORDI A, *et al.* Mobile edge computing: A survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(1): 450–465. doi: [10.1109/JIOT.2017.2750180](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2750180).
- [24] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, and TEMEL Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 1254–1270. doi: [10.1016/j.adhoc.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004).
- [25] IEEE. IEEE Std 1609.4-2016 IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE) -- multi-channel operation[S]. New York, USA: IEEE, 2016: 1–206. doi: [10.1109/IEEESTD.2016.7435228](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7435228).
- [26] JAHN A, DAVID K, and ENGEL S. 5G/LTE based protection of vulnerable road users: Detection of crossing a curb[C]. 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), Boston, USA, 2015: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2015.7390782](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2015.7390782).
- [27] CHENG Xiang, ZHANG Rongqiang, and YANG Liuqing. Wireless toward the era of intelligent vehicles[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(1): 188–202. doi: [10.1109/JIOT.2018.2884200](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2884200).
- [28] NGUYEN V, KIM O T T, PHAM C, *et al.* A survey on adaptive multi-channel MAC protocols in VANETs using Markov models[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 16493–16514. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2814600](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814600).
- [29] LYU F, ZHU Hongzi, ZHOU Haibo, *et al.* MoMAC: Mobility-aware and collision-avoidance MAC for safety applications in VANETs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10590–10602. doi: [10.1109/TVT.2018.2866496](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2866496).
- [30] ZHANG Yue, LIU Kai, LIU Shanzhi, *et al.* A clustering-based collision-free multichannel MAC protocol for vehicular ad hoc networks[C]. 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, USA, 2018: 1–7. doi: [10.1109/VTCFall.2018.8690786](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690786).
- [31] LYU F, ZHU Hongzi, CHENG Nan, *et al.* ABC: Adaptive beacon control for rear-end collision avoidance in VANETs[C]. 2018 15th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON), Hong Kong, China, 2018: 1–9. doi: [10.1109/SAHCN.2018.8397130](https://doi.org/10.1109/SAHCN.2018.8397130).
- [32] SHAH A F M S, ILHAN H, and TURELI U. RECV-MAC: A novel reliable and efficient cooperative MAC protocol for VANETs[J]. *IET Communications*, 2019, 13(16): 2541–2549. doi: [10.1049/iet-com.2018.6171](https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.6171).
- [33] KARABULUT M A, SHAH A F M S, and ILHAN H. OEC-MAC: A novel OFDMA based efficient cooperative MAC protocol for VANETs[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 94665–94677. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2995807](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995807).
- [34] CAO Yi, ZHANG Haixia, FANG Yuguang, *et al.* An adaptive high-throughput multichannel MAC protocol for VANETs[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8249–8262. doi: [10.1109/JIOT.2020.2990568](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2990568).
- [35] LYU F, ZHU Hongzi, ZHOU Haibo, *et al.* SS-MAC: A novel time slot-sharing MAC for safety messages broadcasting in VANETs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3586–3597. doi: [10.1109/TVT.2017.2780829](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2780829).
- [36] LIN Zhiping, SUN Yanglong, TANG Yuliang, *et al.* An efficient message broadcasting MAC protocol for VANETs[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(8): 6043–6057. doi: [10.1007/s11276-020-02415-y](https://doi.org/10.1007/s11276-020-02415-y).
- [37] GAO Jie, LI Mushu, ZHAO Lian, *et al.* Contention intensity based distributed coordination for V2V Safety message broadcast[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 12288–12302. doi: [10.1109/TVT.2018.2876388](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2876388).
- [38] ZHANG Tianjiao and ZHU Qi. EVC-TDMA: An enhanced TDMA based cooperative MAC protocol for vehicular networks[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2020, 22(4): 316–325. doi: [10.1109/JCN.2020.000021](https://doi.org/10.1109/JCN.2020.000021).
- [39] ABD EL-GAWAD M A, ELSHARIEF M, and KIM H. A cooperative V2X MAC protocol for vehicular networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019: 65. doi: [10.1186/s13638-019-1382-8](https://doi.org/10.1186/s13638-019-1382-8).
- [40] DUBE P and WALINGO T. Performance analysis of an adaptive OFDMA-based CSMA/CA scheme on a wireless network[J]. *IET Communications*, 2020, 14(19): 3480–3489. doi: [10.1049/iet-com.2019.1078](https://doi.org/10.1049/iet-com.2019.1078).
- [41] KUMAR S, CHOI S, and KIM H. Analysis of hidden terminal's effect on the performance of vehicular ad-hoc networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019: 240. doi: [10.1186/s13638-019-1548-4](https://doi.org/10.1186/s13638-019-1548-4).
- [42] ZHAO Yuqiang, ZHANG Xuan, ZHENG Rongping, *et al.* Analysis on merging collision probability in TDMA based VANET[C]. 10th EAI International Conference on Wireless and Satellite Systems, Harbin, China, 2019: 3–12. doi: [10.1007/978-3-030-19156-6_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19156-6_1).
- [43] KUMAR S and KIM H. BH-MAC: An efficient hybrid MAC protocol for vehicular communication[C]. 2020 International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS), Bengaluru, India, 2020: 362–367. doi: [10.1109/COMSNETS48256.2020.9027322](https://doi.org/10.1109/COMSNETS48256.2020.9027322).

- [44] DENG Dongxiao, RAO Wenbi, LIU Bingyi, *et al.* TA-MAC: A traffic-aware TDMA MAC protocol for safety message dissemination in MEC-assisted VANETs[C]. 2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Honolulu, USA, 2020: 1–9. doi: [10.1109/ICCCN49398.2020.9209706](https://doi.org/10.1109/ICCCN49398.2020.9209706).
- [45] YANG Yue, KARIMADINI M, XIANG Cheng, *et al.* Wide area surveillance of urban environments using multiple mini-VTOL UAVs[C]. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015: 795–800. doi: [10.1109/IECON.2015.7392196](https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392196).
- [46] XIAO Pengju, WANG Li, CHUAN Jianbin, *et al.* Implementation for UAVs aided edge sensing system in wireless emergency communications[C]. 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Xi'an, China, 2019: 1–5. doi: [10.1109/WCSP.2019.8927886](https://doi.org/10.1109/WCSP.2019.8927886).
- [47] LALIBERTE A S and RANGO A. Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 761–770. doi: [10.1109/TGRS.2008.2009355](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2009355).
- [48] RYAN A and HEDRICK J K. A mode-switching path planner for UAV-assisted search and rescue[C]. The 44th IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain, 2005: 1471–1476. doi: [10.1109/CDC.2005.1582366](https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582366).
- [49] TANG Jinhui, WANG Yequn, DONG Shufu, *et al.* A feedback-retransmission based asynchronous frequency hopping MAC protocol for military aeronautical ad hoc networks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(5): 1130–1140. doi: [10.1016/j.cja.2018.02.014](https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.02.014).
- [50] VASHISHT S and JAIN S. An energy-efficient and location-aware medium access control for quality of service enhancement in unmanned aerial vehicular networks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2019, 75: 202–217. doi: [10.1016/j.compeleceng.2019.02.021](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.02.021).
- [51] KALWAR S, CHIN K W, and WANG Luyao. An orientation aware learning MAC for multi-UAVs networks[C]. 2019 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), Auckland, New Zealand, 2019: 1–4. doi: [10.1109/ITNAC46935.2019.9077959](https://doi.org/10.1109/ITNAC46935.2019.9077959).
- [52] ZHANG Min, DONG Chao, and HUANG Yang. FS-MAC: An adaptive MAC protocol with fault-tolerant synchronous switching for FANETs[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 80602–80613. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2920175](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920175).
- [53] HUANG Xinquan, LIU Aijun, ZHOU Haibo, *et al.* FMAC: A self-adaptive MAC protocol for flocking of flying ad hoc network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(1): 610–625. doi: [10.1109/JIOT.2020.3007071](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3007071).
- [54] WU Guodong, DONG Chao, LI Aijun, *et al.* FM-MAC: A multi-channel MAC protocol for FANETs with directional antenna[C]. 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018: 1–7. doi: [10.1109/GLOCOM.2018.8648025](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8648025).
- [55] ZHENG Bo, LI Yong, CHENG Wei, *et al.* A multi-channel load awareness-based MAC protocol for flying ad hoc networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020: 181. doi: [10.1186/s13638-020-01797-z](https://doi.org/10.1186/s13638-020-01797-z).
- [56] XIE Tian, ZHAO Haitao, XIONG Jun, *et al.* A multi-channel MAC protocol with retrodirective array antennas in flying ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(2): 1606–1617. doi: [10.1109/TVT.2021.3054646](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3054646).
- [57] ZHENG Zhigao, SANGAIAH A K, and WANG Tao. Adaptive communication protocols in flying ad hoc network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(1): 136–142. doi: [10.1109/MCOM.2017.1700323](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700323).
- [58] CHEN Xi, HUANG Chuanhe, FAN Xiyang, *et al.* LDMAC: A propagation delay-aware MAC scheme for long-distance UAV networks[J]. *Computer Networks*, 2018, 144: 40–52. doi: [10.1016/j.comnet.2018.07.024](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.024).
- [59] 刘东, 吴启晖, QUEK T Q S. 面向航空6G的频谱认知智能管控[J]. *物联网学报*, 2020, 4(1): 12–18.
- LIU Dong, WU Qihui, and QUEK T Q S. Spectrum cognitive intelligent management and control for aviation 6G[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(1): 12–18.
- 董超: 男, 1980年生, 教授, 研究方向为天地一体组网、无人机智能组网、移动边缘计算、无线网络协同应用、物联网、大数据驱动的智能网络协议等。
- 陶婷: 女, 1997年生, 硕士生, 研究方向为无人机智能组网、无人机组网MAC协议等。
- 冯斯梦: 女, 1993年, 副研究员, 研究方向为空地一体网络、线光通信组与调制技术等。
- 屈毓铨: 男, 1987年生, 博士, 研究方向为移动边缘计算、空地一体网络、D2D通信和群智感知等。
- 刘青昕: 男, 1998年生, 硕士生, 研究方向为无人机网络架构、频谱智能管控等。
- 吴钰蕾: 女, 1990年生, 本科, 研究方向为无人机协同航迹规划、无人机通信组网。
- 张珉: 男, 1999年生, 博士生, 研究方向为无线通信、无人机群网络等。