

无人机技术辅助的车联网:发展与展望^①

方宇杰^② 李 萌^③ 司鹏搏 杨睿哲 孙恩昌 张廷华

(北京工业大学信息学部 北京 100124)

(先进信息网络北京实验室 北京 100124)

摘 要 近年来,车联网作为智能交通系统的关键使能者,带来了沉浸式的用户体验。然而,车联网系统中仍然存在车辆网络连通性差和数据计算处理效率低等问题。无人机(UAV)因其灵活性高、成本低、易于部署等特点,得到了工业界和学术界的广泛关注和深入研究。无人机技术应用于车联网领域,可以显著提高车联网的数据传输性能,更好地促进车联网的发展。本文对无人机辅助的车联网研究现状及其关键技术进行了系统综述。首先,分别简要介绍了车联网和无人机相关研究背景。其次,从路由协议、轨迹优化、内容缓存、计算卸载和安全隐私等方面详细介绍了无人机技术辅助车联网的相关研究进展。最后,讨论了该研究领域面临的挑战和未来发展趋势。

关键词 无人机(UAV);车联网;通信网络;数据计算;智能交通系统

0 引 言

随着物联网和新一代无线通信技术的快速发展,智能化、网联化成为了汽车行业的发展趋势。网络传输和数据计算处理能力的大幅提升加速了车辆网络到车辆互联网的范式转变^[1]。因此,车联网成为了一种新的网络范式,促进了智能交通系统的发展。在这种新模式下,车辆可以进行实时通信,实现车对车(vehicle-to-vehicle, V2V)、车对行人(vehicle-to-pedestrian, V2P)、车对基础设施(vehicle-to-infrastructure, V2I)、车对基站(vehicle-to-base station, V2B)^[2-3]之间的数据共享。在智能交通系统中,车辆可准确无误地获取周边环境信息(如驾驶信息、道路状况),实时改变行驶策略,这为司机带来了沉浸式驾驶体验,降低了交通事故的发生概率,提高了道路安全性。此外,在新一代智能交通系统

中,车辆间的数据交互提高了车与车之间的安全性和可靠性;在信息娱乐、交通安全和智能导航等多种车载应用中,车与乘客间的数据交互提升了用户的驾乘体验^[4]。

然而,交通环境差和障碍物的存在会导致高响应延迟和低内容响应率,车辆之间的通信链路受到干扰,吞吐量降低。车辆的高速移动和不确定行驶轨迹也带来了一些问题,如车辆容易脱离原有网络的有效覆盖范围,从而导致通信链路中断,网络连通性不能得到保障。

近年来,无人机因其高机动性、自主性、低成本和灵活部署的特点,在军事和民用领域得到了广泛应用^[5-7],如地震灾后营救、交通控制、农作物健康评估等。在物联网应用中,无人机可充当移动接收器收集无线传感网络中地面节点的数据。对于具有监控范围广、节点多、数据传输任务重等特点的大规模物联网来说,无人机可以加快收集速度,提供更长

① 国家自然科学基金(61901011),北京市自然科学基金(L211002)和北京市教育委员会科技计划一般项目(KM202110005021, KM202010005017)资助。

② 男,1997年生,硕士生;研究方向:无人机通信,车联网,网络资源管理;E-mail: fangyj@emails.bjut.edu.cn。

③ 通信作者,E-mail: limeng720@bjut.edu.cn。
(收稿日期:2021-12-13)

的网络生存期和实时的数据传输。无人机与地面用户之间可靠的视距无线传输(line of sight, LoS),形成空对地通信链路可以提供增强的无线覆盖和连通性^[8]。未来,无人机将成为智能交通系统不可或缺的一部分,其硬件灵活的配置使通信、缓存和计算等能力具有较强的扩展性,可以支持各种不同类型的应用。因此,无人机辅助解决车联网的网络服务质量提升,被认为是一种极具前景的方法。然而,目前对无人机技术应用于车联网领域的研究相对较少,且大多研究还只停留在无人机的无线通信设计方面^[9-11]。例如,文献[10]提出了一种基于隐马尔科夫模型的频谱预测方法,以提高无人机通信性能。此外,文献[11]研究了可重构智能表面辅助无人机安全通信,旨在提高系统保密率。

综上所述,本文深入调研了无人机辅助的车联网研究现状及其关键技术,介绍了面向无人机技术辅助车联网场景在网络通信、内容缓存与计算卸载和安全隐私等方面的相关研究进展。此外,本文还对其关键挑战和未来发展趋势进行了广泛深入的探讨。

1 研究现状

无人机辅助车联网的架构如图1所示,主要包括空中无人机层和地面车辆层。支持无线通信的无人机不受地形限制,通过调整自身位置辅助车辆网络,保证了通信的可靠性。

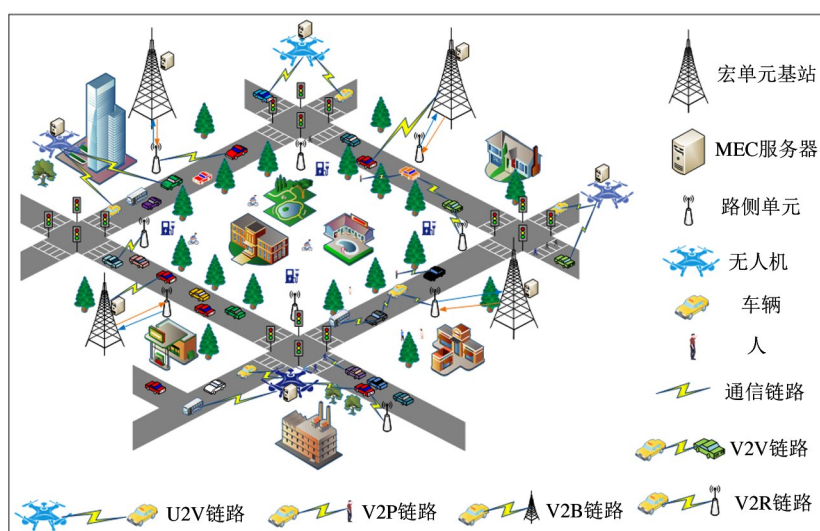


图1 无人机辅助车联网的架构图

1.1 网络通信

1.1.1 路由协议

路由协议对于提供稳定、高效的通信十分重要,对数据传输性能有极大的影响。无人机自组织网络属于移动自组织网络的一种,其多跳通信性能可以提高带宽的利用率。文献[12]将按需距离向量和优化链路状态2种路由协议应用于飞行自组织网络中,提高了节点的连通性。文献[13]提出了无人机直接传送和利用本地连接网络的自组织路由策略相结合的混合数据传输方法,大幅提高了实时数据传输性能,同时降低了路由成本。

在车联网系统中,因障碍物的存在,车辆之间通信链路的可靠性并不稳定。然而,无人机作为空中节点可有效解决这一问题,障碍物存在下的V2V通信网络模型如图2所示。将优化路由协议纳入无人机辅助车联网系统已成为改善车辆通信的一个关键举措。为了实现车辆之间可靠的数据传输,找到有效的端到端连接路径,文献[14]提出了一种新的十字路口无人机辅助车载自组织网络(vehicular Ad Hoc network, VANET)路由协议,具体可以表述为基于路段连通性和车辆分布信息,无人机计算连通程度,并把连通程度作为新字段加入Hello报文中,周

期性与车辆实现共享,确保数据包转换可以选择最连通的路段,提高数据包分发效率。

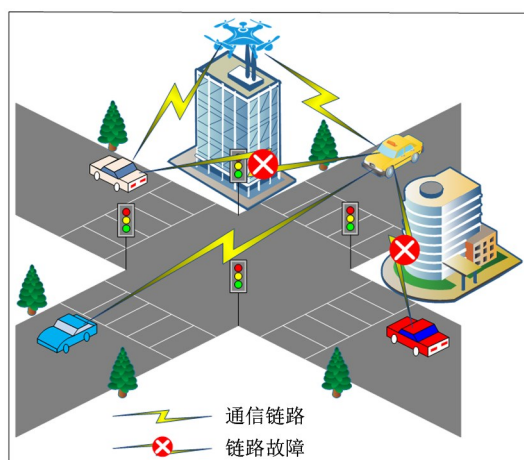


图2 障碍物存在下的 V2V 通信网络模型

无人机的引入,可以提高 VANET 中地理路由方法的收敛速度和资源利用率。文献[15]设计了一种新的路由方法,即基于 Q-Learning 的自适应无人机辅助地理路由。无人机采用模糊逻辑算法计算每条道路的数值模糊,得到道路对信息传输的适宜程度,通过深度优先搜索算法得到全局最优路由路径;地面车辆中间节点根据 Q-Learning 算法结合全局路由路径选择合适的邻居作为下一跳传输数据包。当车辆节点在报文周期内找不到合适的邻居作为数据传输的下一跳时,则该节点的数据包将被转发到无人机上以完成数据传输。

在车载时延可容忍网络(vehicular delay tolerant networks, VDTN)中,车辆与其他设备端对端信息传输效率受到了环境(如灾区营救、城市障碍物等)限制,无人机的引入可以显著提升网络拓扑结构,提升数据传输的路径选择多样性。文献[16]通过计算每次相遇车辆节点之间的相遇概率和持续连接时间,设计了无人机辅助车载时延容忍网络路由协议,该协议有效利用无人机在 VDTN 环境中进行消息转发,提高了通信链路的稳定性和消息转发的可靠性,同时也降低了端到端的时延和网络开销。

1.1.2 轨迹优化

在无人机辅助的车辆通信系统中,设计一种最优的无人机轨迹优化策略,不仅能够提高车辆通信

质量,带给车辆用户极佳的服务质量和体验,而且还能确保无人机飞行过程中的能量消耗达到最小,用来服务更多的车辆用户。文献[17]和[18]对无人机协同路侧单元(roadside units, RSU)辅助车辆网络中的无人机轨迹优化进行了研究。在无线信道建模中均提到了采用仰角相关的 LoS 模型,考虑了车辆与无人机之间的 LoS 路径损耗和非视距(non line of sight, NLoS)路径损耗,从而得出两者之间的平均路径损耗。文献[17]设计了一个包含云计算中心控制层、无人机空中层、多车地面层在内的预调度无人机辅助车辆边缘计算的系统架构。基于交通态势感知来优化无人机飞行轨迹,同时考虑了无人机直线飞行能耗和转弯能耗。通过深度 Q 网络,寻找并确定无人机最优悬停位置,派遣无人机到达指定任务区域协同 RSU 及时为车辆提供通信和计算服务,该方法提高了无人机的服务质量。为了最大化无人机的覆盖范围,减少城市中固定部署的 RSU 数量,保证车辆的通信性能,文献[18]通过改进贪婪算法和蚁群优化算法,根据飞行速度和功率约束,优化了无人机飞行轨迹,其中贪婪算法负责选取适当的无人机飞行点覆盖所有的车辆,蚁群算法确定飞行路线。与传统地面 RSU 部署策略^[19-20]和多无人机以恒定的绕圈飞行策略相比,多无人机协同 RSU 辅助车辆通信更具有减少部署 RSU 和提高网络通信性能的优势。

高峰时段城市交通流量较大,有限的 RSU 资源通常不能为 VANET 提供完善的网络服务。为了服务支撑更多的地面车辆,文献[21]根据交通流结合道路结构设计了最优无人机飞行轨迹,如图3所示。

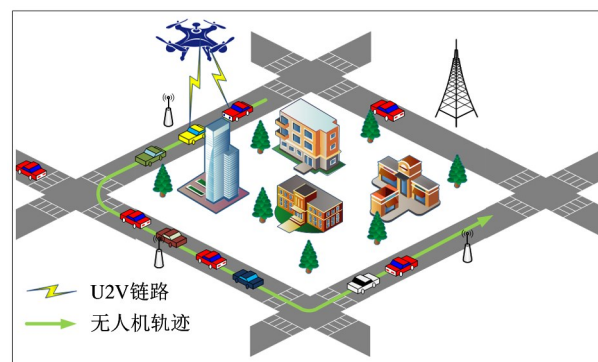


图3 无人机服务地面车辆轨迹示意图

具体而言,无人机可以根据交通流调整自身飞行速度、停留位置和飞行轨迹,并以飞行路径上车辆数量最大为目标,最终形成一条最优飞行路线。之后,无人机在此路径上盘旋并与车辆建立数据链路,分配频谱资源,从而保证车辆网络速率最大化。

1.2 内容缓存与计算卸载

无人机技术与移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)技术的结合为基础设施匮乏的偏远地区的通信、计算和存储等服务提供了保障。与传统固定位置的 MEC 服务器相比,无人机辅助的 MEC 技术具有灵活、部署方便等特点,适用于机动调度和动态组网。另外,无人机可以作为有一定缓存容量的移动缓存中继,预先缓存流行内容,并为用户提供请求内容传输服务,有效减轻回程链路流量负载。

1.2.1 内容缓存

当前,已有诸多学者面向物联网系统引入无人机辅助缓存技术进行了深入而广泛的研究。文献[22]提出一种无人机辅助的雾计算网络,无人机作为雾计算节点,配置缓存单元,从而减少了用户接入时延,实现了良好的系统缓存性能。为进一步提高无人机辅助网络的系统缓存性能,文献[23]将多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术引入无人机辅助无线网络,建立了多用户 MIMO 无人机网络模型,将高速缓存命中概率作为性能指标加以分析,结果表明该模型有效提高了支持缓存的无人机网络的缓存性能。内容缓存在某些程度上也可以保证数据的安全,文献[24]将无人机作为中继节点从基站获取内容并提供给用户设备,实现了用户之间的隐私安全。

在车联网系统中,内容缓存是减少网络时延的有效方法。通过在基站和附近用户设备部署缓存,使得流行内容更加接近目标用户实现低时延传输,例如视频传输等。然而,对于用户不在基站的覆盖区域等情况,无人机可以缓存流行内容,减少前馈和反馈网络的负担。为了更好地为车辆的流行内容服务,文献[25]提出一种基于缓存的卫星-无人机-车辆集成网络,设计了能量感知的编码缓存策略。在该架构中,同步卫星作为云服务器,无人机被部署为边缘服务器,提供了更多的组播机会,减少了回程链

路之间能量消耗,提高了能效。

传统车辆网络中 V2V、V2I、V2B 通信链路在网络拓扑结构的动态变化下,很难维持用户所需的服务质量和用户体验需求。为了显著提高网络吞吐量和降低数据传输延迟,文献[26]和[27]提出了一种具有主动缓存功能和先进的文件共享策略的无人机辅助的数据传播协议。在主动缓存阶段,利用无人机进行有序的广播,为其飞行覆盖范围内的车辆缓存数据文件,提升了缓存效率,降低了时延,提高了系统的吞吐量;在文件共享阶段,车辆通过 V2V 通信链路彼此共享缓存的文件,提高了网络的传输性能。而文献[27]在文献[26]的基础上,通过基于三维空间坐标的动态轨迹调度算法优化无人机的轨迹来缩短整个主动缓存时间。在文件共享阶段利用递归最小二乘法信道预测算法实现近似实时处理,降低了通信网络资源开销。

提高数据吞吐量和服务质量的满意度对于车联网系统具有重要意义。文献[28]和[29]研究了在网络拓扑结构动态变化的车辆网络中,对包含内容放置和内容传递的无人机缓存方案与飞行轨迹进行联合优化,确保无人机辅助地面车辆网络传输高带宽内容文件。具体而言,文献[28]从缓冲层和轨迹内容交付层分别对无人机的平均可实现吞吐量进行优化。在此基础上,文献[29]提出了一种基于学习的方法,通过离线优化,在线决策实时寻找最优解,最大限度提高了网络吞吐量。

在自动驾驶方面,车辆需要及时获取区域环境的安全交通信息,数据缓存会缩短相应的内容响应时间。然而,在一些交通环境较差或建筑物遮挡的情况下,缓存内容在上传或下载时,会存在较高的响应延迟和较低的数据传输效率。为了满足车辆用户对安全驾驶内容的需求,文献[30]设计了一种基于深度 Q-Learning 的空中辅助车辆缓存架构,其包含飞艇、无人机和车辆的三层缓存方案,如图 4 所示。车辆发送内容请求时,无人机进行内容响应。若出现无人机未缓存所请求的内容时,飞艇实现无人机实时调度,应对了无人机有限的缓存空间和能量,提高了车辆用户内容缓存响应率。

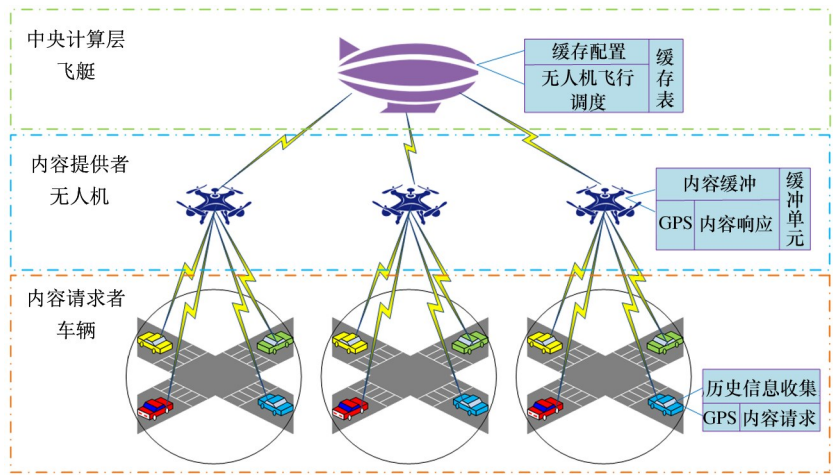


图 4 无人机辅助车辆三层缓存架构图

1.2.2 计算卸载

随着第 5 代移动通信技术 (the 5th generation mobile communication technology, 5G) 的快速发展, 移动边缘计算在车联网方面的应用得到了学术界广泛的关注。由于装配在车辆上的处理器通常存储容量有限或计算资源不足, 无法完全处理或只能部分处理计算密集型任务, 并且会产生巨大的能量消耗和延迟, 这对一些时延敏感需求的用户设备来说具有很大的挑战。为了解决这一问题, 通过在基站部署 MEC 服务器, 车辆通过无线传输协议或专用短程通信技术把计算密集型任务卸载到边缘服务器进行计算, 可以有效地缓解车辆的计算压力。然而, 作为边缘节点的基础设施位置通常是固定的, 而且部署成本相对较高, 导致一些区域没有基础设施允许网络接入, 从而不能更好地满足高速移动车辆的服务质量要求。

现有研究针对无人机辅助移动边缘计算方面开展了大量的工作, 无人机可以作为辅助节点, 在终端设备与部署 MEC 服务器的无线接入点 (access point, AP) 之间提供通信。文献[31]介绍了在终端设备与 AP 之间通信链路中断情况下, 通过部署无人机辅助的 MEC 系统, 终端设备可以本地计算, 也可以将任务卸载到无人机进行处理。同时, 无人机也可将数据传输到 AP 进行计算, 提高计算资源的利用率的同时获得了较低的计算时延和系统能耗。对于移动用户数量较多或网络设备分布稀疏的情况, 文献[32]提出了物联网设备可通过无人机辅助,

将计算任务卸载到边缘云上, 以便为因信号中断而无法访问地面边缘云服务器的物联网设备提供移动边缘计算服务。对于交通流量密集的地区, 由配备摄像头、传感器、计算和通信资源的无人机作为移动基站获取数据并执行本地处理; 此外, 无人机也可将复杂的任务卸载给 MEC 服务器, 降低能耗和处理时间^[33]。

面向车联网, 无人机可以充当装备 MEC 服务器的空中基站, 与车辆形成传输可靠的 LoS 连接, 辅助车辆用户进行计算任务卸载, 其模型图如图 5 所示。在文献[34-36]中, 为了优化系统能耗和车辆任务执行时间, 均提出了车辆的计算处理任务分为车辆利用自身的计算资源进行本地计算, 或将任务卸载到无人机, 无人机作为 MEC 服务器执行计算, 以及将任务直接卸载到配备有边缘服务器的基站执行。文献[35]还考虑部署无人机作为中继节点, 协助车辆

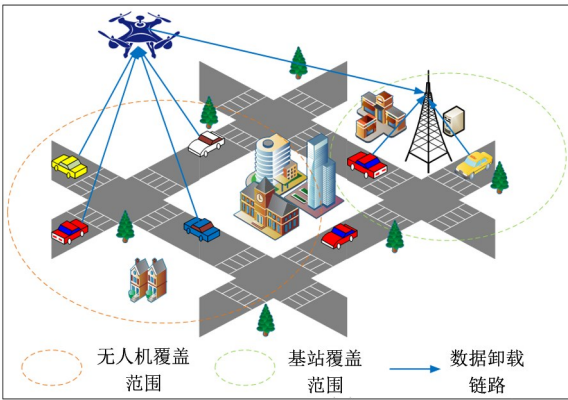


图 5 无人机辅助车辆计算卸载模型图

将计算任务转发给 MEC 服务器,同时还加入了软件定义网络控制器实时收集全部设备信息,制定卸载策略,使车辆用户做出卸载决策,最小化系统成本。

在整个计算卸载过程中,文献[34]和[36]考虑了车辆和无人机之间利用 IEEE 802.11P 协议通信,通过载波侦听多路访问/冲突避免的介质访问控制协议实现无人机与车辆之间的数据传输,考虑了请求发送/允许发送(request to send/clear to send, RTS/CTS)方法,任务传输成功周期都加入了 RTS 和 CTS 帧间间隔。文献[34]具体综合考虑了 MEC 选择、资源分配和任务卸载,提出了一个以最小化任务处理延迟为目标的多目标优化问题。基于负载均衡准则联合进行 MEC 选择决策,并根据拉格朗日对偶分解对卸载率和计算资源优化,提出了一种无人机辅助 VANET 的 MEC 选择、资源分配和任务卸载联合算法。而文献[36]研究了无人机配合 RSU 辅助 VANET 的联合节能卸载和车辆关联的问题,证明了该问题是一个混合整数线性问题,进而将其解耦为节能卸载和用户关联 2 个子问题,并利用标准凸优化方法求解,实验结果表明该算法降低了系统能耗。

1.3 安全与隐私

在未来的智能交通系统中,车辆与车辆、RSU、基站之间的安全通信至关重要。在大数据信息时代,安全的数据传输可有效避免个人隐私的泄露。因此,在无人机辅助的车联网中,安全通信具有广泛的应用前景和研究价值。文献[37]考虑了被动窃听、主动窃听、串谋窃听场景下的 V2V 通信,无人机作为干扰器来干扰窃听者接收的信号,并作为空中基站通过 LoS 链路增强车辆发射所需的信号强度,提高了车与一切实体(vehicle-to-everything, V2X)通信的安全性。在此基础上,文献[38]研究了无人机的地面覆盖范围和飞行高度对无人机辅助车联网系统的保密中断性能的影响。此外,文献[39]提出了一种超椭圆曲线密码技术、数字签名和哈希函数相互融合的隐私保护认证方案,降低了无人机的计算和通信资源开销,防止入侵者获取无人机和车辆位置导致的敏感数据泄露。

针对非法无人机干扰降低合法无人机与车辆的

通信链路的可靠性,如图 6 所示,文献[40]提出一种基于攻防博弈的无人机辅助车联网的安全数据传输方案。通过攻防博弈分析建模得到无人机和干扰器之间的纳什均衡,提高了干扰器攻击下的无线通信性能。在灾难救援场景中,路边基础设施遭到破坏无法收集和分析具体车辆位置信息,从而无法准确判断事故发生地。通过具备存储和通信资源的车辆在无需部署基础设施的情况下实现容忍延迟数据的传输^[41],可解决上述问题。然而,在车辆稀疏或因道路阻断车辆行驶范围受限,信息无法迅速传播到车辆网络中。因此,文献[42]利用车对车通信预测信息扩散控制无人机飞行轨迹,通过无人机空中节点,迅速向更多的车辆传播有用信息,快速确定事故地点,争取救援时间以最大程度减少伤亡。

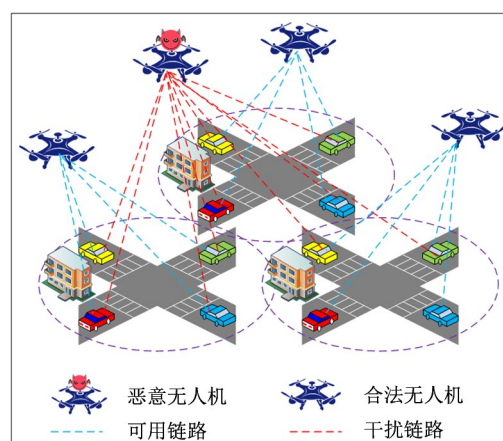


图 6 干扰器存在时无人机辅助的 V2V 通信网络架构

2 未来机遇及挑战

在车联网系统中,通过引入无人机辅助技术,显著提高了车辆用户对服务质量和体验质量的满意度,改善了车联网的网络环境,降低了网络负载和能源消耗,优化了缓存和计算资源的配置。然而,无人机辅助的车联网架构中还存在一些关键问题和挑战。同时,相关前沿技术的融合也将为之带来了重大机遇和研究方向。

2.1 存在的问题

2.1.1 数据传输问题

车联网系统中的车辆具有高速移动的特性,所形成的车辆网络拓扑结构呈现高动态变化。无人机

节点的移动、链路因电源故障或动态网络拓扑结构发生变化的中断、有限的能量和时间等资源使得路由协议的设计十分困难。因此,针对不同类型的无人机辅助车联网,应该建立不同的路由机制,如何寻找最有效的路径以及以较低的路由成本获得高质量的数据传输性能是一个具有挑战性的研究。无人机辅助的车联网为通信网络发生故障的场景中的实时数据传输提供了方便,根据网络拥塞、设备破坏、无人机数量增加等网络状态的变化设计可靠的实时数据(如视频、音频等)传输架构十分重要。在未来的研究中,无人机通过环境感知,自适应做出相应的动作保证网络的连通性,完成实时数据传输、计算等相关问题亟待关注。

2.1.2 能源效率问题

在智慧城市中,无人机动态部署在车联网系统中,其执行任务的动作(飞行、悬停)和数据传输、计算都将消耗大量能量。然而,无人机因配备有限的电源能量成为了智能交通系统快速发展的瓶颈。因此,如何改善无人机的能源消耗成为了巨大的挑战。在未来的研究中,可以根据历史交通情况,在车辆密度较大的地方设置无人机充电站,并配备一架具有相同作用的候选无人机。无人机在车流量大的上空执行任务,电量到达设定的充电阈值时与候选无人机互换角色完成车辆请求的任务。此外,通过部署无人机群、形成飞行自组织网也可有效应对挑战。当无人机出现电量不足时,把计算任务交付给其他无人机并返回邻近充电桩充电,此时形成的新飞行自组织网络继续辅助车联网系统,完成必要的数据传输。未来,如何进一步提高无人机的能源效率,进而更好地服务支撑车联网系统也将是一个重要课题。

2.1.3 应急响应问题

应急事故的发生极大地影响了城市交通安全,因此,建立高效的应急响应系统可以显著提升事故处理效率,降低生命财产损失,并且可以有效避免二次事故的发生。为了派遣应急车辆快速、安全到达事故发生地,减少事故处理时间,改善道路安全,文献[43]提出了一种应急车辆优先系统,通过考虑事故的类型和严重程度,选择合适应急车辆的优先级,

结合当前交通状况提供更好的应急管理服务。此外,文献[44]提出了一种整数线性规划方法,通过V2V通信链路收集道路类型以及车辆信息(位置和速度),给出使应急车辆速度和链路空闲空间最大化的链路路径。然而,这些研究仅局限在考虑以地面车辆为主的二维场景,无法满足日益增加的应急事故处理需求和响应效率。通过构建无人机辅助车联网的三维应急响应模式,将是该领域未来的发展方向。通过无人机搜集路况信息为车联网应对突发状况提供科学依据,实现资源的合理分配。未来,设计高效的优化策略以确保车联网系统在不同环境下的服务质量,提高车辆的精确视觉感知和应急响应时间,最大限度减少应急车辆对正常交通的负面影响,是值得关注的研究方向。

2.2 研究机遇与挑战

2.2.1 毫米波技术支持

毫米波技术在5G通信部署方面展示出巨大潜力并发挥至关重要的作用。毫米波具有极高的带宽与波束窄的特点,能够更精确分辨目标并还原目标细节,与sub-6 GHz优势互补,可有效缓解下一代蜂窝网络的频谱紧缩问题^[45]。毫米波与无人机辅助的车联网融合,为系统带来了大带宽、高数据率,降低了无人机与车辆之间的传输时延。

毫米波覆盖了7 GHz波段(57~64 GHz)超越了sub-6 GHz波段的窄带宽^[46],有效地扩大了无人机的覆盖范围,为通信链路带来了高增益,更加适合无人机辅助的车联网架构。未来,随着5G及下一代通信技术的全面演进,毫米波有望成为无人机辅助车联网不可或缺的关键技术之一。

2.2.2 6G网络演进

随着无线通信技术的发展,5G已逐步落地并商用,6G网络的研究工作也已全面展开。与5G技术相比,6G需要通过使用小型蜂窝或新的无线电频谱频段(如7~20 GHz或sub-THz)以提供更大的容量和速度^[47]。无人机与6G网络的融合在一定程度上可以降低部署密集传输网络的成本。此外,6G网络具有超高峰值速率、极低时延和定位精度高等特点,将为空地一体化带来机遇,实现全球无缝覆盖。具备自适应性被学术界认为是6G网络的基本特征之

一,文献[48]设想了一种无人机辅助的车辆边缘计算系统,以满足 6G 网络下 V2X 通信需求,并提供 3D 和自适应服务覆盖,实现车辆密集的计算任务和数据卸载。

在智能交通系统中,6G 网络有望为车辆提供高速通信。然而,因通信带宽和通信频率增加,具有密集型应用的车辆与边缘基础设施频繁交互,给物联网设备带来了巨大的负担^[49]。文献[49]把数据量大的任务作为任务收集节点,通过无人机采集任务,降低了 6G 网络下与车辆交互的物联网设备的能耗。

2.2.3 区块链技术应用

目前,相关研究更多将无人机作为干扰中继节点防止车辆数据被窃听。然而,在该过程中存在干扰合法车辆正常通信的可能性。目前,将区块链技术应用与无人机辅助的车联网系统中的研究还相对较少。区块链具有去中心化、不可篡改和开放性等特点,为无人机辅助的车辆通信系统带来了应用前景,其网络架构模型如图 7 所示。区块链技术中的智能合约可以为无人机与车辆之间的数据传输过程建立信任机制^[50],保证了通信的安全性及可靠性。

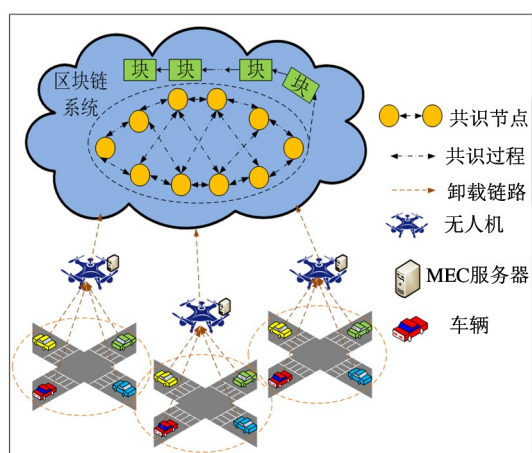


图 7 区块链支持的 V2V 通信无人机辅助数据传输网络

在未来空地一体化架构中,多架无人机通过动态部署形成飞行自组织网络辅助车联网系统。区块链技术集成公开加密算法(如椭圆曲线加密)^[51]的发展适合具有分布式特点的空地一体化网络,并为之带来巨大的安全效益。区块链安全共识机制为无人机间的数据共享提供了可能,防止恶意无人机或其他车辆的攻击(如重放攻击),加快了无人机处理

数据的速度,在某种程度上降低了系统的时延和能量消耗。

2.2.4 人工智能技术赋能

人工智能(artificial intelligence, AI)技术的快速发展为无人机辅助的车联网提供了史无前例的发展机遇。与传统的优化方法(如凸优化、博弈论等)相比,基于 AI 的解决方案对动态环境具有持续学习能力,并且能够以较低的计算复杂度进行实时推理^[52]。AI 算法中的联邦学习(federated learning, FL)优化策略通过共享数据模型而不是原始数据,避免了因车联网应用中因数据激增而产生的数据隐私泄露。但是,低效率通信已经成为基于人工智能优化过程的一个关键瓶颈。为此,文献[53]把无人机作为中继节点,辅助车辆将模型参数转发给计算处理服务器,提升了网络的拓展性和可操作性,使 FL 模型在处理过程中的性能显著增强。文献[54]提出了一种基于区块链的去中心化横向联邦学习框架,采用阈值多签名智能合约为跨域无人机提供动态认证服务,消除了无人机协作学习障碍,解决了数据隐私泄露问题。融合元学习的深度强化学习算法训练的策略具有良好的泛化能力,可以通过有限的经验快速适应新环境^[55]。在无人机辅助车联网架构中,应用元学习方法,保证了车辆快速适应环境中的动态变化,提高了车联网智能决策的泛化性能。

3 结 论

本文对无人机技术应用于车联网领域进行了系统性综述。详细总结了无人机技术在车联网领域的应用现状,包括无人机与车联网的通信、无人机辅助车辆数据内容缓存和边缘计算卸载以及在安全隐私方面的研究工作。最后,指出了无人机应用于车联网中的关键问题,并展望了毫米波、6G 网络、区块链和人工智能等技术为无人机辅助的车联网发展带来的机遇与挑战。通过对无人机辅助的车联网及其相关技术综述,回顾总结了已有的研究成果及其关键技术,希望能够为未来本领域的相关研究带来一定的理论依据和参考借鉴。

参考文献

- [1] ANBALAGAN S, BASHIR A K, RAJA G, et al. Machine-learning-based efficient and secure RSU placement mechanism for software-defined-IoV[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(18): 13950-13957
- [2] YADAV L, KUMAR S, KUMARSAGAR A, et al. Architecture, applications and security for IOV: a survey [C] // 2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking, Greater Noida, India, 2018: 383-390
- [3] HU B B, FANG L Y, CHENG X, et al. In-vehicle caching (IV-Cache) via dynamic distributed storage relay (D²SR) in vehicular networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 843-855
- [4] ZHANG R Q, ZENG F H, CHENG X, et al. UAV-aided data dissemination protocol with dynamic trajectory scheduling in VANETs [C] // 2019 IEEE International Conference on Communications, Shanghai, China, 2019: 1-6
- [5] ZHAO J W, WANG Y, FEI Z X, et al. NOMA-aided UAV data collection system: trajectory optimization and communication design [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 155843-155858
- [6] CHEN M Y, LIANG W F, LI Y C. Data collection maximization for UAV-enabled wireless sensor networks[C] // 2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks, Honolulu, USA, 2020: 1-9
- [7] LI Y, LIANG W F, XU W Z, et al. Data collection maximization in IoT-sensor networks via an energy-constrained UAV[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(1): 159-174
- [8] OUBBATI O S, CHAIB N, LAKAS A, et al. UAV-assisted supporting services connectivity in urban VANETs [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3944-3951
- [9] GAO N, ZENG Y, WANG J, et al. Energy model for UAV communications: experimental validation and model generalization [J]. *China Communications*, 2021, 18(7): 253-264
- [10] ZHAO Y W, LUO S, YUAN Z K, et al. A new spectrum prediction method for UAV communications [C] // 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications, Chengdu, China, 2019: 826-830
- [11] LI S X, DUO B, RENZO M D, et al. Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6402-6417
- [12] LEONOV A V, LITVINOV G A, KORNEEV D A. Simulation and analysis of transmission range effect on AODV and OLSR routing protocols in flying Ad Hoc networks (FANETs) formed by mini-UAVs with different node density [C] // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, Minsk, Belarus, 2018: 1-7
- [13] YOON J J, DOH S J, GNAWALI O, et al. Time-dependent Ad-Hoc routing structure for delivering delay-sensitive data using UAVs[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 36322-36336
- [14] OUBBATI O S, LAKAS A, LAGRAA N, et al. UVAR: an intersection UAV-assisted VANET routing protocol [C] // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016: 1-6
- [15] JIANG S S, HUANG A T, JI Y F. Adaptive UAV-assisted geographic routing with Q-learning in VANET [J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(4): 1358-1362
- [16] DU Z Y, WU C, YOSHINAGA T, et al. A routing protocol for UAV-assisted vehicular delay tolerant networks [J]. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2021, 2: 85-98
- [17] WU Z W, YANG Z, YANG C, et al. Joint deployment and trajectory optimization in UAV-assisted vehicular edge computing networks[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2022, 24(1): 47-58
- [18] CAI R, FENG Y J, HE D Z, et al. Trajectory optimization for large-scale UAV-assisted RSUs in V2I communication [C] // 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference, Victoria, Canada, 2020: 1-6
- [19] SHRIVASTAVA P K, KAMBLE M, SHRIVASTAVA P, et al. HRSUD: hybrid roadside unit deployment system to improve vehicular communication in VANET [C] // 2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Bhopal, India, 2021: 66-73
- [20] GUERNA A, BITAM S. GICA: An evolutionary strategy for roadside units deployment in vehicular networks [C] // 2019 International Conference on Networking and Advanced Systems, Annaba, Algeria, 2019: 1-6
- [21] MANZOOR A, DANG T N, HONG C S. UAV trajectory design for UAV-2-GV communication in VANETs [C] // 2021 International Conference on Information Networking, Jeju Island, Korea, 2021: 219-224
- [22] LI X J, SHEN J C, SUN Y, et al. A smart content caching and replacement scheme for UAV-assisted fog computing network [C] // 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2020: 1040-1045

- [23] WEI M H, CHEN Y J, ZHANG B X, et al. The improvement of caching performance by employing MIMO on UAVs[C] // 2020 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference, Fuzhou, China, 2020: 1-3
- [24] JI J Q, ZHU K, NIYATO D, et al. Joint cache and trajectory optimization for secure UAV-relaying with underlaid D2D communications[C] // 2020 IEEE International Conference on Communications, Dublin, Ireland, 2020: 1-6
- [25] GU S S, SUN X Y, YANG Z H, et al. Energy-aware coded caching strategy design with resource optimization for satellite-UAV-vehicle integrated networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(8): 5799-5811
- [26] LU R, ZHANG R Q, CHENG X, et al. UAV-assisted data dissemination with proactive caching and file sharing in V2X networks[C] // 2019 IEEE Global Communications Conference, Waikoloa, USA, 2019: 1-6
- [27] ZHANG R Q, LU R, CHENG X, et al. A UAV-enabled data dissemination protocol with proactive caching and file sharing in V2X networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(6): 3930-3942
- [28] WU H Q, CHEN J Y, FENG L, et al. Joint caching and trajectory design for cache-enabled UAV in vehicular networks[C] // 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Xi'an, China, 2019: 1-6
- [29] WU H Q, FENG L, ZHOU C H, et al. Optimal UAV caching and trajectory in aerial-assisted vehicular networks: a learning-based approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(12): 2783-2797
- [30] SHI J L, ZHAO L, WANG X W, et al. A novel deep Q-learning-based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(7): 4348-4358
- [31] ZHANG T K, XU Y, LOO J, et al. Joint computation and communication design for UAV-assisted mobile edge computing in IoT[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5505-5516
- [32] YU Z, GONG Y M, GONG S M, et al. Joint task offloading and resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 3147-3159
- [33] KIM K, HONG C S. Optimal task-UAV-edge matching for computation offloading in UAV assisted mobile edge computing[C] // 2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, Matsue, Japan, 2019: 1-4
- [34] HE Y X, ZHAI D S, ZHANG R N, et al. A mobile edge computing framework for task offloading and resource allocation in UAV-assisted VANETs[C] // IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications Workshops, Vancouver, Canada, 2021: 1-6
- [35] ZHAO L, YANG K Q, TAN Z Y, et al. A novel cost optimization strategy for SDN-enabled UAV-assisted vehicular computation offloading[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(6): 3664-3674
- [36] AUNG P S, TUN Y K, EI N N, et al. Energy-efficient offloading and user association in UAV-assisted vehicular Ad Hoc network[C] // 2020 21st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, Daegu, Korea, 2020: 108-113
- [37] SHANG B D, LIU L J, MA J H, et al. Unmanned aerial vehicle meets vehicle-to-everything in secure communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(10): 98-103
- [38] LI T T, YE J, DAI J B, et al. Secure UAV-to-vehicle communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(8): 5381-5393
- [39] KHAN M A, ULLAH I, ALKHALIFAH Ali, et al. A provable and privacy-preserving authentication scheme for UAV-enabled intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(5): 3416-3425
- [40] LIU B, SU Z, XU Q C. Game theoretical secure wireless communication for UAV-assisted vehicular Internet of Things[J]. *China Communications*, 2021, 18(7): 147-157
- [41] SI P B, HE Y, YAO H P, et al. DaVe: offloading delay-tolerant data traffic to connected vehicle networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 3941-3953
- [42] KAWAMOTO Y, MITSUHASHI T, KATO N. UAV-aided Information diffusion for vehicle-to-vehicle (V2V) in disaster scenarios[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2022, 10(4): 1909-1917
- [43] KARMAKAR G, CHOWDHURY A, KAMRUZZAMAN J, et al. A smart priority-based traffic control system for emergency vehicles[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(14): 15849-15858
- [44] HANNOUN G J, MURRAY-TUITTE P, HEASLIP K, et al. Facilitating emergency response vehicles' movement through a road segment in a connected vehicle environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(9): 3546-3557

- [45] LIU C H, HO K H, WU J Y. MmWave UAV networks with multi-cell association: performance limit and optimization[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(12): 2814-2831
- [46] CHEN Z J, TIAN J, LIU H W, et al. Novel pattern-diverse millimeter-wave antenna with broadband, high-Gain, enhanced-coverage for energy-efficient unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 4081-4087
- [47] SIZER T, SAMARDZIJA D, VISWANATHAN H, et al. Integrated solutions for deployment of 6G mobile networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(2): 346-357
- [48] HU J N, CHEN C, CAI L, et al. UAV-assisted vehicular edge computing for the 6G Internet of vehicles: architecture, intelligence, and challenges[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2021, 5(2): 12-18
- [49] LIU, R, LIU A F, QU Z Z, et al. An UAV-enabled intelligent connected transportation system with 6G communications for Internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(2): 2045-2059
- [50] VIRIYASITAVAT W, XU L D, BI Z, et al. Blockchain technology for applications in Internet of things—mapping from system design perspective [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8155-8168
- [51] GHRIBI E, KHOEI T T, GORJI H T, et al. A secure blockchain-based communication approach for UAV networks[C]//2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology, Chicago, USA, 2020: 411-415
- [52] JIANG F B, WANG K Z, DONG L, et al. AI driven heterogeneous MEC system with UAV assistance for dynamic environment: challenges and solutions [J]. *IEEE Network*, 2021, 35(1): 400-408
- [53] NG J S, LIM W Y B, DAI H N, et al. Joint auction-coalition formation framework for communication-efficient federated learning in UAV-enabled Internet of vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2326-2344
- [54] FENG C S, LIU B, YU K P, et al. Blockchain-empowered decentralized horizontal federated learning for 5G-enabled UAVs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(5): 3582-3592
- [55] YUAN Y, ZHENG G, WONG K K, et al. Meta-reinforcement learning based resource allocation for dynamic V2X communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 8964-8977

Unmanned aerial vehicle-assisted Internet of vehicles: development and prospect

FANG Yujie, LI Meng, SI Pengbo, YANG Ruizhe, SUN Enchang, ZHANG Yanhua
(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)
(Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing 100124)

Abstract

In recent years, as a key enabler of intelligent transportation systems, the Internet of vehicles has brought immersive user experiences. However, there are still some problems in the Internet of vehicles system, such as poor connectivity of vehicle network and low efficiency of data calculation and processing. Due to its flexibility, low cost and easy deployment, unmanned aerial vehicle (UAV) has attracted extensive attention and in-depth research in industry and academia. The application of UAV technology in the field of Internet of vehicles can improve the data transmission performance significantly and promote the development of Internet of vehicles efficiently. This paper reviews the research status and key technologies of UAV-assisted Internet of vehicles systematically. Firstly, the research background related to the Internet of vehicles and UAV is briefly introduced. Secondly, the research progress of UAV-assisted vehicle network is introduced in detail from the aspects of routing protocol, trajectory optimization, content cache, computing unload and security and privacy. Finally, the challenges and future trends in this field are discussed.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), Internet of vehicle, communications network, data computing, intelligent transportation system