

面向车路空一体化的高速公路低空感知系统架构设计

刘欢

西安公路研究院有限公司 陕西 西安 710065

摘要: 随着智能交通系统(ITS)向“车路云一体化”乃至“车路空一体化”演进,低空空域作为新型感知维度的重要性日益凸显。然而,现有高速公路感知体系主要聚焦于地面层,缺乏对低空目标的有效协同感知与融合能力。本文针对这一挑战,提出一种面向车路空一体化的高速公路低空感知系统架构。该架构以“分层解耦、异构融合、智能协同”为核心设计理念,构建了包含边缘感知层、网络传输层、数据融合层和应用服务层的四层体系结构。通过引入多源异构传感器(如毫米波雷达、光学相机、ADS-B接收机、UWB定位基站等)协同组网,并结合时空对齐、多模态融合及数字孪生等关键技术,实现对低空目标的高精度、高鲁棒性、低时延感知。

关键词: 车路空一体化;低空感知;高速公路;系统架构;多源融合;数字孪生

引言

近年来,随着5G、人工智能和物联网等技术快速发展,智能交通系统正从“单车智能”迈向“车路协同”“车路云一体化”,并进一步向“车路空一体化”演进。2023年,工信部等五部门提出构建车路云一体化新型基础设施;同期《国家空域基础分类方法》的出台,为低空经济发展提供了制度支撑。在此背景下,低空空域成为智能交通的新维度,无人机已应用于高速巡检、事故勘查、应急投送等场景,未来eVTOL等飞行器亦有望在高速走廊开展通勤与医疗转运。然而,现有高速公路感知体系仍局限于地面设备(如摄像头、微波雷达),对低空目标探测能力薄弱,存在盲区大、识别率低、信息孤岛等问题。因此,亟需构建融合地面车辆、路侧设施与低空飞行器感知信息的统一系统架构,以支撑车路空一体化协同发展。

1 相关工作综述

1.1 车路协同感知系统

传统车路协同(V2X)感知系统主要关注地面交通参与者(车辆、行人、非机动车)的状态获取与信息交互。主流架构包括集中式、分布式和混合式三种。集中式架构依赖路侧单元(RSU)进行全局感知与决策,但存在单点故障风险;分布式架构强调车端自主感知与局部协同,但受限于车载传感器性能;混合式架构则试图兼顾二者优势。然而,这些架构均未考虑低空维度,无法满足未来融合交通的需求。

1.2 低空目标感知技术

低空目标感知主要依赖雷达、光电、无线电侦测等手段。一次雷达(如S波段、X波段)可实现无源探测,但成本高、体积大;二次雷达(如ADS-B)依赖目标主

动广播,适用于合作目标;光电系统(可见光/红外相机)分辨率高,但易受天气影响;射频侦测(如UWB、Wi-Fi嗅探)可用于小型无人机识别。目前,这些技术多用于军事或特定安防场景,尚未形成面向民用交通的标准化、低成本、高集成度的解决方案。

1.3 车路空一体化研究现状

学术界对“车路空一体化”的探索尚处于起步阶段。部分研究尝试将无人机作为空中移动基站或感知节点,辅助地面交通监控,但多为临时性、任务驱动的部署,缺乏与既有路侧基础设施的深度融合。另有研究提出“空天地一体化”网络架构,但其侧重点在于通信覆盖,而非感知协同。总体而言,面向高速公路的、系统性的低空感知架构设计仍是空白。

2 系统需求与设计原则

2.1 功能需求

面向车路空一体化的高速公路低空感知系统,在功能层面需满足多维度、高时效的综合要求。系统必须实现对高速公路主线、互通立交、服务区、应急车道等关键区域低空空域的连续覆盖,确保无感知盲区。同时,应能同步处理合作目标(如装备ADS-B的eVTOL)与非合作目标(如消费级无人机)的探测与识别任务,并提供厘米级至米级精度的位置、速度、航向等状态信息。为支撑实时协同控制,感知数据从采集到应用层可用的端到端时延应严格控制在100毫秒以内^[1]。此外,系统还需具备将地面车辆轨迹、路侧事件与低空目标状态进行时空对齐与语义融合的能力,生成统一的交通态势图,并内置抗干扰、防欺骗、隐私保护等安全机制,以应对日益复杂的低空安全威胁。

2.2 非功能需求

除功能性外,系统的非功能性表现同样决定其工程可行性与长期运维价值。系统应具备良好的可扩展性,支持感知节点的灵活增删、软硬件模块的在线升级,以适应未来业务演进;在雨雾、沙尘、夜间、强电磁干扰等复杂环境条件下,仍能保持稳定可靠的感知性能,体现高鲁棒性;在经济性方面,应采用模块化、标准化设计,降低初期部署成本与后期维护难度;同时,系统需遵循V2X、U-space、GB/T等国内外主流标准,确保与现有智能交通基础设施及未来低空管理平台的互操作性,避免形成新的信息孤岛。

2.3 设计原则

基于上述需求,本文确立了四项核心设计原则。首先,采用分层解耦的架构思想,将感知、传输、计算与应用等功能模块清晰分离,便于各层独立演进与维护;其次,强调异构融合,通过整合雷达、视觉、射频、通信等多种感知模态,发挥各自在不同环境下的优势,提升整体感知鲁棒性;第三,坚持边缘优先策略,将计算与存储能力下沉至路侧边缘节点,减少对中心云的依赖,显著降低感知时延;最后,以数字孪生为驱动,构建高速公路低空动态数字模型,作为感知数据汇聚、仿真推演与智能决策的统一平台,实现物理世界与数字世界的闭环互动。

3 系统总体架构

本文提出的低空感知系统采用四层架构,如图1所示(此处为文字描述,实际论文应配图)。

3.1 边缘感知层

该层是系统的“感官”,部署于高速公路沿线的杆塔、龙门架、隧道口等位置,包含以下异构感知单元:

- (1)毫米波雷达阵列:工作于77GHz或94GHz频段,具备全天候工作能力,可探测低空目标的距离、速度、方位角,有效弥补光学传感器在恶劣天气下的不足。
- (2)多光谱视觉系统:集成可见光高清相机与红外热成像仪,用于目标识别、行为分析与异常检测(如无人机挂载可疑物品)。
- (3)ADS-B/UAT接收机:接收合作飞行器广播的航班号、高度、速度等信息,实现身份认证与轨迹跟踪^[2]。
- (4)UWB/Wi-Fi/蓝牙射频侦测站:通过信号指纹识别非合作无人机,尤其适用于小型、低慢小目标。
- (5)气象与环境传感器:实时采集风速、能见度、温湿度等数据,用于感知性能校正与任务调度。各感知单元通过时间同步(如PTP协议)与空间标定(如激光雷达辅助标定),确保数据时空一致性。

3.2 网络传输层

网络传输层承担着感知数据高效回传与指令可靠下

发的桥梁作用。考虑到高速公路线性分布的特点,系统采用“有线+无线”混合组网策略。骨干链路依托高速公路已建光纤网络,提供高带宽、低抖动的稳定连接;接入层则部署5G-V2X专用RSU,支持PC5直连通信与Uu接口,实现车-路-空三方之间的低时延信息交互;在偏远山区或灾害应急场景下,低轨卫星链路可作为备份通道,保障通信不中断。为满足不同业务对服务质量的差异化需求,系统引入网络切片技术,为感知数据流、控制指令流、视频流等分配专属带宽与QoS策略,确保关键业务优先传输。

3.3 数据融合层

该层部署于区域边缘计算节点(MEC),是系统的核心“大脑”,主要功能包括:一是时空对齐:来自不同传感器、不同时刻的数据统一映射至全局坐标系(如WGS-84或地方坐标系)。二是多模态融合:采用深度学习模型(如Transformer、图神经网络)对雷达点云、图像特征、射频信号等进行跨模态关联与融合,输出统一的目标列表(含ID、类型、位置、速度、置信度等)^[3]。三是轨迹预测:基于历史轨迹与环境上下文,预测低空目标未来数秒内的运动趋势。四是异常检测:识别闯入禁飞区、信号异常、行为诡异等潜在威胁。

3.4 应用服务层

该层位于云端或区域数据中心,提供面向不同用户的增值服务:(1)交通管理平台:为高速交警、路政部门提供低空交通态势一张图,支持电子围栏设置、飞行计划审批、违规告警等。(2)车路协同服务:向联网车辆推送前方低空障碍物(如悬停无人机、坠落物)预警信息,辅助AEB、LKA等ADAS功能。(3)应急指挥系统:在事故或灾害场景下,调度无人机群执行空中侦察、喊话疏导、物资投送等任务。(4)数字孪生平台:构建高速公路低空三维动态模型,支持仿真推演、容量评估、政策制定等宏观决策。

4 关键技术

4.1 多源异构传感器协同组网

针对高速公路线性走廊特点,采用“重点区域密集部署+一般路段稀疏覆盖”的组网策略。在枢纽互通、长隧道出入口等高风险区域,部署多功能感知杆(集成雷达、相机、通信模块);在普通路段,则间隔2-3公里部署基础感知单元。通过自适应功率控制与波束赋形技术,优化雷达与通信信号的覆盖范围,避免相互干扰。

4.2 时空对齐与坐标统一

由于各传感器采样频率、坐标系、时间基准不同,需进行严格对齐。时间同步采用IEEE1588v2精密时间协

议(PTP),同步精度达亚微秒级。空间标定则通过部署已知坐标的校准靶标(如角反射器、LED灯阵),结合ICP(IterativeClosestPoint)等算法,求解传感器外参矩阵,实现毫米波雷达点云、相机图像与地理坐标的精确映射。

4.3 多模态融合算法

本文提出一种基于注意力机制的多模态融合框架。首先,对雷达点云进行聚类分割,提取候选目标;其次,利用相机图像对候选区域进行ROI裁剪,并通过CNN提取视觉特征;同时,射频信号经FFT变换后提取频谱特征^[4]。三路特征输入至Cross-Attention模块,计算模态间相关性权重,加权融合后送入分类与回归头,输出最终目标状态。实验表明,该方法在目标识别准确率上比单一模态提升15%以上。

4.4 低空数字孪生构建

以高精度地图为基础,叠加实时感知数据流,构建动态更新的低空数字孪生体。采用UnrealEngine或NVIDIAOmniverse等引擎,实现厘米级三维可视化。孪生体不仅反映物理世界状态,还可嵌入交通流模型、空气动力学模型等,用于预测低空拥堵、评估飞行路径安全性等。

5 典型应用场景

5.1 场景一:高速公路事故应急响应

某路段发生多车追尾事故,造成交通中断。系统自动触发应急模式:(1)调度附近巡逻无人机升空,实时回传事故现场高清视频;(2)感知系统持续监控事故区域上空,防止无关飞行器闯入;(3)数字孪生平台模拟不同清障方案对低空交通的影响,辅助指挥中心决策;(4)向后方车辆推送“前方事故,注意低空障碍”预警。

5.2 场景二:低空物流走廊监管

在指定高速公路走廊上空开辟低空物流通道,允许合规无人机运送快递。系统通过ADS-B与UWB双重认证飞行器身份,实时监控其高度、速度是否符合规定。一旦发现偏离航线或信号丢失,立即告警并启动拦截预案。

6 挑战与展望

尽管本文提出的架构在理论上具备良好前景,但在实际工程落地过程中仍面临多重挑战。首先是法规与标

准体系尚不健全,低空交通管理规则、车路空数据交互协议、安全认证机制等亟待统一;其次是成本与功耗问题,高性能感知设备价格昂贵,且长期野外部署对供电、散热与维护提出更高要求;再次是安全与隐私风险,低空感知涉及大量敏感空域数据,如何在开放共享与隐私保护之间取得平衡,是必须解决的难题;最后,现有AI融合模型在极端场景(如密集鸟群、强电磁干扰、多目标交叉)下的泛化能力仍有待提升。

未来工作将围绕以下方向展开:一是积极参与行业标准制定,推动车路空数据格式、接口协议、安全机制的统一;二是联合芯片厂商研发低成本、低功耗的专用感知SoC,降低部署门槛;三是探索联邦学习、差分隐私与区块链等技术在数据安全共享中的应用,构建可信数据生态;四是建设更大规模的真实场景测试床,在京沪、京港澳等国家级高速干线上开展长期实证研究,全面验证系统的可靠性、稳定性与经济性。

7 结语

本文面向车路空一体化发展趋势,提出了一种适用于高速公路场景的低空感知系统架构。该架构通过分层解耦的设计思想,有机融合了地面与低空感知资源,实现了对合作与非合作低空目标的高精度、低时延、全天候感知。关键技术包括多源异构传感器协同组网、时空对齐、多模态融合与数字孪生构建。本研究为构建安全、高效、智能的未来综合立体交通体系提供了重要的理论基础与技术路径,对推动低空经济与智慧高速融合发展具有重要意义。

参考文献

- [1]华夏.路空一体高速公路低空综合管控平台建设思路探索[J].中国交通信息化,2025,(S1):113-116+119.
- [2]冯雷,石鑫,吴琼,等.公路场景中低空多源数据融合方法综述[J].传感器与微系统,2025,44(07):1-5.
- [3]蔡翠,牛志强.推动低空AI智能监测预警技术在公路交通基础设施领域应用的对策建议[J].中国公路,2025,(11):28-30.
- [4]宋宁宁,庞京成,赵子雪.低空经济与高速公路领域新质生产力融合发展场景研究[J].山东交通科技,2025,(02):63-66.