

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：将来自不同传感器、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.