

智慧高速车路协同感知系统关键技术研究

刘贵宣

云南云岭高速公路交通科技有限公司 云南 昆明 650051

【摘要】：智慧高速车路协同感知系统在复杂场景中存在感知精度不足、多源数据异构、传输延迟、极端环境适配差等问题。本文聚焦这些痛点，研究异构传感器协同感知方法，构建边缘计算辅助的多源数据分级融合框架，提出动态信道下感知信息可靠传输策略，并通过真实高速场景闭环测试验证效能。研究有效弥补单一传感器短板，提升系统全天候感知精度与传输可靠性，打通感知与车辆决策的传递壁垒，为系统工程化落地及智慧高速发展提供技术支撑。

【关键词】：智慧高速；车路协同；感知系统；多源传感器融合；边缘计算

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.033

引言

随着交通运输智能化转型加速，智慧高速成为提升通行效率与安全水平的核心载体，车路协同感知系统作为其核心支撑，承担着交通环境精准感知、信息实时交互的关键使命。当前，高速场景中恶劣天气、复杂路段及多设备协同等因素，导致现有感知系统存在精度不足、传输时延高、全天候适配性差等问题，难以满足车路协同与自动驾驶的实际需求。为此，本文聚焦智慧高速车路协同感知的核心痛点，深入探究异构传感器协同、低时延信息交互等关键技术，为构建高效、可靠、全天候的车路协同感知体系提供技术参考。

1 智慧高速车路协同感知系统关键技术研究

(1) 现行感知系统在高速复杂场景下面临的核心问题：当前高速公路车路协同感知系统受限于单一传感器固有缺陷与环境耦合效应，在复杂场景下性能显著下降。影像传感器在雨雾、强逆光、夜间等条件下成像质量劣化，且目标遮挡会直接干扰检测结果；毫米波雷达虽具备全天候工作能力，但角分辨率不足，难以区分密集车流中的相邻车辆，易出现目标分裂或合并异常；激光雷达可提供高精度三维信息，但在雨雪雾天气中探测距离衰减严重，且成本高昂，制约规模化部署^[1]。多源融合层面，异构传感器间存在时空配准误差与数据格式差异，边缘节点算力有限，难以支撑海量数据的实时处理，导致融合结果中常出现虚假目标。此外，山区弯道、隧道、桥梁等区域因信号遮挡或部署条件限制，仍存在明显监测盲区，无法实现全域连续覆盖。

(2) 车路协同感知亟待解决的关键技术瓶颈：异构多源感知数据的深度融合是首要技术难点。路侧摄像头、毫米波雷达、激光雷达及车载终端的数据在采

样频率、坐标系、时间戳上存在固有差异，融合前需高精度时空同步，否则会导致目标匹配错位或重复检测。复杂环境下的感知鲁棒性同样亟待突破，雨雪、浓雾、光照突变等极端条件会显著劣化传感器数据质量，现有算法对环境退化的自适应能力不足，难以保障全天候检测精度。低时延高可靠信息传输方面，车辆高速移动引发通信链路频繁切换，多径效应与信号衰减导致数据丢包和时延抖动，边缘节点算力竞争与带宽受限进一步加剧了传输不可靠性。此外，感知-决策闭环传递环节中，路侧感知结果如何高效、准确地传递给车载决策系统，并适配不同车型的控制逻辑，仍是当前工程化落地的薄弱环节。

(3) 研究目标与技术攻关路径总体思路：智慧高速车路协同感知系统研究以实现全路段、全时段、高精度的交通状态感知与信息协同交互为核心目标，聚焦感知精度不足、多源设备数据异构、车路信息传输时延高、极端场景适应性差等核心痛点，构建覆盖“感知-传输-融合-决策”全链路的技术体系。技术攻关路径立足工程化应用需求，以实际场景为导向，先完成多源感知设备的选型与适配，优化路侧摄像头、毫米波雷达、激光雷达等设备的部署方案，再突破多模态感知数据融合算法，解决不同设备数据时空同步、冗余剔除与互补增强问题，同步优化车路通信协议以降低传输时延，最后通过场景化测试验证技术可行性，逐步完善系统适配能力，实现感知系统与智慧高速管控、车辆自动驾驶的深度协同。

2 面向全天候运行的异构传感器协同感知方法

(1) 恶劣天气与光照突变下的感知失效问题分析：气象扰动与光照骤变构成智慧高速车路协同感知体系运行失效的主要诱因，各类故障表现具备差异化与多维度复杂特征。雨雪雾天气改变空间大气传播属性，微粒介质对激光探测光束形成散射损耗与能量吸

收, 缩减有效探测距离、降低点云数据密度, 设备难以判别车体形态与路面标识信息^[2]。浓雾环境劣化影像采集成像效果, 画面清晰度与明暗反差持续衰减, 算法难以完成交通主体与周边背景的有效区分。环境光照条件骤然波动易诱发传感参数偏移, 强光直射造成影像过曝丢失细节信息, 暗光逆光场景加剧画面噪声干扰并模糊目标边界。激光探测设备同样受外界杂光干扰出现精度偏移, 各类感知信息出现失真偏差, 数据参考价值大幅降低, 难以支撑系统调度决策环节稳定运行, 直接影响全域全天候场景下的综合工作能力。

(2) 基于毫米波雷达与视觉融合的目标检测增强技术: 毫米波雷达视觉融合检测增强技术结合双传感硬件互补优势, 改善单一设备在智慧高速场景的感知短板, 提升目标检测综合性能。毫米波雷达环境适应能力突出, 雨雾、强光逆光环境均可稳定获取目标距离及运动数据, 有效探测距离超 250m, 测距精度可达 $\pm 0.32\text{m}$, 自身横向定位偏差较大且无法识别目标类别。影像设备能够提取目标纹理轮廓信息, 实现车辆、行人、非机动车分类判别, 成像效果易受光照与气象条件制约。嵌入式平台直连双源原始数据, 省去传输与编解码环节, 数据处理时延控制在 50ms 以内。空间配准实现多源数据统一融合, 多维特征挖掘整合异构数据内在关联, 补齐单体设备性能缺陷, 实现路面目标精准识别与连续轨迹跟踪, 满足智慧高速全天候高精度监测使用需求。

(3) 激光雷达与红外相机联合标定与时空同步策略: 激光雷达与红外相机联合标定围绕双设备坐标系精准配准展开, 面向智慧高速全天候运行需求, 融合无标志物标定与专用标板标定思路, 缓解红外成像分辨率偏低、激光点云分布稀疏造成的特征匹配难点。菱形九孔标板构建差异化温度特征, 几何约束损失函数优化特征点位参数, 精确解算设备间旋转平移参数, 重投影误差管控于 3 像素区间。时空同步兼顾测算精度与工程实用属性, 软触发搭配 Strobe 预输出形成复合触发机制, 多类授时协议校正设备时钟偏移, 低成本惯性测量单元辅助运动状态补偿, 滑动窗口非线性模型统一时序信息, 修正设备采集时序错位问题, 时序对齐误差达到亚毫秒级别, 消解动态路况下数据匹配错位现象, 保障雨雾夜间等复杂环境下多源感知信息统一完整。

3 低时延高可靠的感知信息交互与融合机制

(1) 路侧与车端感知信息传输中的延迟与丢包难题: 车路两端感知信息传输过程存在的时延偏高、数据丢包问题由多重因素共同作用形成, 直接削弱智慧

高速车路协同体系数据响应效率与传输稳定性。通行车辆高速移动状态易造成通信链路频繁跳转, 信号强度衰减与多径效应扰动持续加剧, 数据包传播与队列等待时长同步增加, 信息交互时效难以得到保障。路侧及车载传感终端产生的海量异构数据体量庞大, 有限网络带宽难以承载全量数据流转, 链路拥堵状况直接造成数据分组丢失现象^[3]。边缘节点内部算力资源竞争分配矛盾、多类型硬件接口适配损耗进一步放大传输滞后效应, 无线频段资源紧缺衍生的空间信号干扰问题, 同样加剧数据传输损耗状况, 车路两端感知信息难以保持同步交互状态, 后续多源数据融合环节的信息匹配精度也随之受到干扰 (见图 1)。

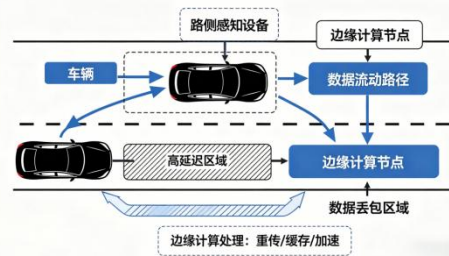


图 1 车路协同场景下数据传输延迟与丢包及边缘计算处理机制

(2) 边缘计算辅助的多源感知数据分级融合框架: 边缘计算驱动的多源感知数据分层融合架构适配路侧节点异构算力条件, 按照数据处理优先级与响应时效完成层级划分, 实现多源信息高效汇聚与快速运算解析。架构以路侧边缘节点作为运行载体, 配置轻量化推理模型与实时数据处理模块, 针对激光雷达、摄像设备、毫米波雷达及车载终端原始数据实施预处理操作, 完成空间配准、信号降噪与时序规整, 借助高精度授时协议实现微秒级数据同步, 消解多传感设备间的数据偏差。整体划分原始、特征、结果三级融合层级, 底层完成单源数据归集整合, 中层依托神经网络挖掘异构数据内在关联特征并进行综合优化, 顶层结合滤波算法修正融合结果, 输出高精度全域路况感知信息。本地算力承担全量数据运算工作, 规避海量数据云端传输带来的时延损耗, 保障融合结果稳定可靠, 满足智慧高速车路协同场景动态感知应用需求。

(3) 动态信道下感知信息可靠传输与自适应调度方法: 针对智慧高速通信链路因车辆高速移动、构筑物遮挡、电磁干扰出现参数波动, 导致感知信息传输不稳定的问题, 本文研究动态信道下感知传输优化与资源自适应调控方法。依托 5G-V2X 多模通信与时间敏感网络特性, 构建强化学习频谱动态接入模型, 结合链路实时反馈与业务优先级分级, 实现毫秒级通信

链路动态重构。具备边缘计算能力的路侧终端采用频分复用优化传输链路，通过功率自适应调控根据信号增益动态调整发射功率，有效抑制外界干扰、提升传输可靠性。引入李雅普诺夫优化理论统筹信息采集、链路选择与资源调度整体决策，实现车车、车路通信平滑切换，并结合车辆轨迹预测与车流态势动态分配传输顺序、频谱带宽资源，保障碰撞预警、路面监测等高时效性业务稳定可靠传输，整体方案可适配智慧高速复杂多变的动态运行环境。

4 复杂交通环境下感知系统综合验证与应用适配

(1)多车多路侧单元协同感知的一致性与冲突问题：多车多路侧单元协同感知的一致性核心在于实现多源异构感知数据的时空基准统一，路侧单元与车载终端搭载的摄像头、雷达等传感器存在采样频率、坐标系、数据格式的固有差异，再加上网络传输抖动、设备时钟漂移及处理链路延迟，极易导致感知数据在时间戳对齐和空间坐标映射上出现偏差。这种一致性缺失会表现为同一交通目标的位置、速度等参数在不同感知节点间的表述差异，破坏全局环境感知模型的完整性^[4]。感知冲突的产生源于多维度因素，恶劣天气下不同传感器的环境适应性差异会引发检测结果矛盾，遮挡、视角偏差会导致部分节点漏检而部分节点误检，异构设备的数据语义不统一以及分布式决策中局部最优选择的偏差，会进一步加剧冲突，导致协同感知系统输出混乱，无法为智慧高速的协同决策提供可靠支撑。

(2)面向真实高速场景的感知系统闭环测试与效能评估：围绕实景高速环境构建感知系统闭环测试与综合性能评估体系，选取搭载 V2X 通信、边缘计算及路侧感知设备的智慧高速专属路段作为试验区域，搭建融合真值检测车辆与全域数据基准平台的测试架构。试验过程完整采集车辆车道归属、空间坐标、行驶速度、加速度、航向角等运行参数，同步收录路侧与车载设备运行数据及全景影像信息^[5]。测试覆盖车辆队列行驶、障碍物规避、协同换道、纵向间距调控

等高频路况，依托规范化试验车辆与高精度采集设备，保障动态数据采集精度契合试验标准。性能评估围绕通行安全、道路通行效率、服务质量维度开展，剖析系统目标识别稳定性、数据传输时延、定位误差及应急响应能力，结合设备运行状态与实测数据，实现感知系统实景应用下全流程校验与整体性能综合研判。

(3)感知能力向车辆决策与控制的有效传递及工程适配：感知能力向车辆决策与控制的有效传递及工程适配，核心是打通路侧感知与车载终端的信息交互壁垒，实现感知数据向驾驶决策指令的精准转化与稳定落地。路侧感知设备采集的交通目标、路况状态、突发事件等数据，经边缘计算单元完成筛选、融合与标准化处理后，通过 C-V2X 通信技术以低延迟、高可靠的方式传输至车载终端，确保数据在复杂高速场景下不出现丢失、误传。工程适配过程中，需结合不同车型的决策控制逻辑，优化感知数据的传输协议与格式，适配车载计算平台的算力需求，同时兼顾路侧设备与车载终端的兼容性，解决不同厂商设备互联互通的问题，通过场景化调试适配高速行驶、恶劣天气、匝道汇入等复杂工况，让感知信息能够精准匹配车辆决策需求，转化为可直接执行的控制指令，保障车辆协同行驶的安全性与稳定性。

5 结语

智慧高速车路协同感知系统的技术突破的核心，在于破解复杂场景下感知精度、传输可靠性与全天候适配性的核心痛点。本文针对异构传感器协同、低时延信息交互、多节点数据融合等关键技术展开深入研究，通过多模态传感器融合策略、边缘计算辅助的分级融合框架及动态信道自适应传输方法，有效弥补了单一感知设备短板，提升了系统在恶劣环境与复杂路段的感知效能。后续研究需进一步强化技术工程化落地能力，优化设备兼容性与成本控制，推动感知系统与车辆自动驾驶、高速交通管控的深度协同，为智慧高速安全高效运行提供更坚实的技术支撑，助力交通运输领域的智能化转型升级。

参考文献：

[1] 程宝顺.智慧高速车路协同系统探析[J].中国交通信息化,2024,(S2):94-98.
 [2] 张志宁.智慧高速车路协同系统的应用[J].工程建设与设计,2023,(16):91-93.
 [3] 宋勇.基于车路协同场景的智慧高速节能减排研究[J].运输经理世界,2023,(17):70-72.
 [4] 张国锋,李宁,秦通.智慧高速公路车路协同系统构建方案研究[J].北方交通,2023,(06):91-94.
 [5] 张亮兵.车路协同技术在智慧高速领域的应用[J].智能建筑与智慧城市,2023,(01):169-171.