

面向车路协同的智能路侧系统多传感器布设优化与集成研究

潘国强 卢康康

山东金宇信息科技集团有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要:近年来,随着多源感知技术的成熟,部署雷达、视频、微波、超声波、激光、红外以及气象环境检测等多类传感器,感知手段日趋多样。然而,不同传感器在精度、时延、覆盖范围与成本等方面差异显著。进入新一代智能交通控制网阶段,路侧系统功能已从单纯的信息采集,扩展至通信、边缘计算与数据融合等多维领域。基于此,本文从信息需求分析、传感器选型、布设模型构建等方面,系统探索面向车路协同的智能感知新体系,以期为新世代交通控制网的建设提供参考。

关键词:智能路侧系统;多传感器;边缘计算;北斗系统;数据融合

Research on Multi-sensor Deployment Optimization and Integration for Intelligent Roadside Systems Oriented to Vehicle-road Coordination

Pan Guoqiang, Lu Kangkang

Shandong Jinyu Information Technology Group Co., Ltd., China Shandong Jinan 250000

Abstract: In recent years, with the maturity of multi-source perception technology, various types of sensors such as radar, video, microwave, ultrasonic, laser, infrared, and meteorological environment detection have been deployed, making perception methods increasingly diverse. However, different sensors vary significantly in terms of accuracy, latency, coverage, and cost. Entering the new generation of intelligent transportation control networks, the functions of roadside systems have expanded from simple information collection to multiple dimensions including communication, edge computing, and data fusion. Based on this, this paper systematically explores a new intelligent perception system for vehicle-road coordination from aspects such as information demand analysis, sensor selection, and deployment model construction, with the aim of providing references for the construction of the new generation of transportation control networks.

Keywords: Intelligent roadside system; Multi-sensor; Edge computing; Beidou system; Data fusion

0 引言

随着智能交通系统发展,车路协同技术进步,道路基础设施的智能化水平逐渐成为交通现代化的重要标志。车路协同系统以车辆、路侧设备及云端平台之间的信息交互为核心,实现道路运行状态的实时感知与交通要素的动态协同控制。在这一体系中,智能路侧系统作为感知与决策的关键节点,承担着环境信息采集、交通事件检测、车辆状态监测与通信中继等多项任务。在此背景下,多传感器的布设优化,不仅关系到信息的完备性与精度,更直接影响边缘计算节点的处理效率与系统响应时间。

1 面向车路协同的智能路侧系统体系结构设计

1.1 智能路侧系统功能定位与需求

智能路侧系统是车路协同体系中的关键,核心作用

在于为车辆、道路及交通管理中心提供高效、准确、时效性强的环境与交通信息支持。系统功能主要包括交通流监测、路况识别、事件预警、气象感知与信息交互等多个方面,旨在实现从被动感知到主动服务的转变。在整体架构中,智能路侧系统承担连接车辆感知与交通控制的桥梁任务,是实现人、车、路、云信息协同的关键节点。

从需求方面看,系统设计应以车路协同的综合信息需求为导向,面向交通安全保障、运行效率提升与应急管理三类核心应用。交通安全方面,要求系统具备对事故多发点、瓶颈路段及复杂交通环境的高精度监测能力;运行效率方面,强调在多车协同和车队运行中提供实时交通状态与最优控制信息;应急管理方面,要求在突发事件发生后实现快速识别、定位与响应,缩短信息传递与决策链路。

1.2 系统总体架构与组成

1.2.1 感知层：多类型传感器与信息采集模块

感知层承担智能路侧系统的数据源职能，精准捕获交通流、道路环境及车辆运行状态等基础信息。为满足车路协同的多维感知需求，系统在不同场景下采用视频监控、微波雷达、地磁检测、激光雷达、气象监测、北斗定位及超宽带（UWB）测距等多类型传感器协同工作。各类传感器在时空分辨率、检测范围与环境适应性方面各具优势，形成互补的感知体系。视频与雷达负责动态交通目标识别，地磁与线圈监测车辆通行状态，气象与路面传感器掌握环境变化，为交通安全决策提供支撑。

1.2.2 通信层：DSRC、C-V2X 与 5G 通信协议集成

通信层承担车路信息交互与协同控制，基于专用短程通信（DSRC）技术，构建低时延、本地化的数据交互通道，支撑车辆与路侧单元间的基础信息交换；同时，蜂窝车联网（C-V2X）扩展通信范围，形成更高级别的网络协同结构，实现区域级交通状态感知与联动控制。5G 网络在此体系中扮演高带宽、高可靠通信的骨干角色，为高清视频监测、远程控制与多源数据融合提供传输保障。

1.2.3 计算层：边缘计算与数据处理架构

计算层是智能路侧系统的核心枢纽，具有多源数据实时处理、分析与决策支持的功能。该层依托边缘计算架构，将数据处理功能下沉至路侧节点，使感知信息在本地实现快速响应与协同分析，减少数据传输延迟，提升系统整体时效与可靠性。结构以分布式计算节点为基础，结合高性能嵌入式处理单元与轻量化算法模型，实现交通、气象、视频及定位等多类数据的分级处理与融合。

1.2.4 应用层：交通安全与流量控制服务

应用层能转化数据价值、输出决策指令，依托实时交通感知信息与环境监测数据，构建交通安全预警、流量调控、事件处置及服务管理的综合业务体系。在安全管理方面，系统依据多源数据融合结果实施危险识别与分级响应，及时发出车道占用、超速、低速、异常停车等警示信息，维护道路运行秩序；在流量控制方面，依据交通运行状态自动调整信号配时、匝道放行与限速策略，缓解拥堵并提升通行效率；在应急服务方面，实现突发事件智能研判与处置联动，为交通管理部门提供决策支撑与辅助指挥手段。

2 智能路侧系统的信息需求与传感器选型

2.1 信息需求分析与采集指标体系

信息需求分析重点是厘清系统在交通流监测、道路安

全预警、环境感知及应急响应等方面的具体数据要求。针对不同应用场景，区分宏观交通流控制与微观车辆协同预警两类需求，前者关注流量、速度、密度等连续性指标，后者注重目标检测、轨迹预测及事件识别等瞬时特征。在采集指标体系构建上，综合考虑数据的时空粒度、更新频率与测量精度，确保信息的完整性与一致性。指标体系应包括交通参数、路况特征、气象环境、突发事件等多维信息，形成分层、分区、分级的指标框架。基础层以交通运行数据为主，强化路段级连续观测；关键层聚焦瓶颈点、出入口及事故多发区；决策层侧重融合多源信息，为车路协同控制与安全评估提供高精度支撑。

2.2 交通、气象、路况与事件监测传感器类型分析

交通监测主要依托地感线圈、微波雷达、视频图像识别、超声波检测等设备，捕获车流量、车速及车道占有率等关键参数；气象监测以气温、湿度、风速、能见度和降雨量为核心指标，常采用光学散射式能见度仪、超声风速仪与气象多要素一体化模块，服务于行车安全预警；路况检测聚焦路面结构状态与通行环境，地磁传感器、激光雷达与高频毫米波雷达共同构成路面异常识别体系；事件监测针对交通事故、拥堵、违法停车及抛洒物等突发状况，依赖高分辨率视频监控与融合算法实现快速感知。

3 多传感器布设优化模型与算法

3.1 多传感器布设问题建模与目标函数构建

面向车路协同的智能路侧系统中，多传感器布设问题实质上是一个多目标约束下的组合优化问题。布设方案需在交通信息覆盖率、检测精度与建设成本间平衡，并兼顾数据时空冗余与关键节点精度强化。假设路网结构由节点集合 $N=\{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ 与路段集合 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_j\}$ 构成，每一传感器布设方案可表示为二元变量向量 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_j\}$ ，其中 $y_j=1$ 表示在路段 e_j 上配置传感器， $y_j=0$ 表示未配置。系统目标在于在给定预算约束下，使交通信息感知的全面性与有效性达到最优。为刻画传感器布设所带来的交通信息增益，引入交通状态量测误差平方和作为性能指标。定义在路段 e_j 上的真实交通参数为 Q_j ，估计值为 \hat{Q}_j ，则系统总误差为：

$$J_1 = \sum_{j=1}^m w_j (Q_j - \hat{Q}_j)^2$$

其中， w_j 为该路段的重要性权重，反映交通流特征的时空敏感度。该式度量在传感器有限的条件下，布设对交通状态估计精度的影响程度。为了限制系统投资规模，设传感器单元成本为 c_j ，总预算上限为 C_{\max} ，形成约束：

$$\sum_{j=1}^m c_j y_j \leq C_{max}$$

该约束使布设方案在经济可行的前提下保持覆盖均衡。综合考虑交通事件检测灵敏度与布设冗余度，引入目标函数：

$$\min F(Y) = \alpha J_1 + \beta \sum_{(i,j) \in E} \rho_{ij} |y_i - y_j|$$

其中， ρ_{ij} 为相邻路段交通状态的空间相关系数， α 与 β 为权重因子，分别控制检测精度与布设平衡的影响强度。在实际优化过程中，需结合道路等级、交通流时变特性及关键节点（如匝道、互通立交、瓶颈路段）的安全权重，对不同区域采用差异化密度配置策略。

3.2 基于道路拓扑结构的分层布设模型

为强化布设的结构逻辑，本文提出一种基于道路拓扑结构的二层分层布设模型，将高速公路网抽象为主干层与局部层。主干层以“路段 - 节点”为核心，负责宏观交通流信息采集与流向判定；局部层引入“匝道 - 出入口”结构，用以刻画微观事件特征及交通扰动的空间分布。两层之间形成信息传递与监测冗余的动态耦合体系，从而在传感器资源有限条件下实现检测效益的全局最优。

在该模型中，假设道路网络拓扑以有向图表示 $G=(N,E)$ ，其中 N 为节点集合， E 为边集合。节点包含互通枢纽、出入口、合流点与分流点，边代表路段或匝道。对任意边 $e_{ij} \in E$ ，设传感器布设状态变量为：

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若在边 } e_{ij} \text{ 上布设传感器;} \\ 0, & \text{若未布设传感器。} \end{cases}$$

布设目标在于最小化路网整体检测误差与冗余度，同时约束传感器数量及关键节点覆盖率。构建综合优化目标函数如下：

$$\min F = \sum_{(i,j) \in E} \left[\alpha \left(\frac{\sigma_{t,ij}}{\bar{t}_{ij}} \right)^2 + \beta R_{ij} (1 - Y_{ij}) \right]$$

其中， $\sigma_{t,ij}$ 为 e_{ij} 边的行程时间标准差， \bar{t}_{ij} 为平均行程时间， R_{ij} 表示该路段交通流相关冗余系数， α 、 β 为权重参数，用以平衡检测稳定性与成本效益。分层布设模型的核心思想在于，主干层以交通流波动的全局可观测性为约束，保证路网时空连续监测；局部层则依据拓扑结构中的关键位置节点，补充微观事件探测密度。节点重要度 I_i 可定义为：

$$I_i = \omega_1 D_i + \omega_2 C_i + \omega_3 P_i$$

其中， D_i 表示节点出入度， C_i 为交通流集中度， P_i 为事故发生概率；三者权重 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 依据历史交通安

全数据库标定。节点重要度决定传感器优先布设顺序，主干层与局部层的协调使监测系统兼顾空间覆盖与数据精度，实现“关键节点密集、一般路段稀疏”的分级布设格局。

3.3 出入口与匝道路段关键监控点布设

出入口及匝道区域是交通流状态突变最为显著的空间节点，该类区域交通事件高发、数据时变性强，需在布设策略上综合考虑检测密度、传感器类型与空间覆盖率的多维约束。出入口区域的布设遵循“分层覆盖、动态耦合”的原则，核心在于捕捉车辆由主线向匝道或由匝道并入主线时的交通流扰动效应。假设在某一监控区段内，主线流量为 Q_m ，匝道流量为 Q_r ，则节点处总流量满足质量守恒条件：

$$Q_i = Q_m + \alpha Q_r$$

其中， α 为匝道与主线汇流效率系数，取值范围为 $[0,1]$ ，用于表征车辆进入主线时的有效通行率。该参数受匝道几何结构、车流组成及信号控制策略影响。当偏低时，交通扰动加剧，提高传感器布设密度以增强数据分辨率；当 α 接近 1 时，则优先考虑传感器类型的异质组合以提升感知维度。

在匝道路段，交通流呈现出明显的非平稳性与空间相关性。为量化传感器的布设效益，引入检测贡献度函数 F_i ，定义为：

$$F_i = \frac{w_1 \cdot \sigma_v(i) + w_2 \cdot \sigma_q(i)}{C_i}$$

其中， $\sigma_v(i)$ 与 $\sigma_q(i)$ 分别表示第 i 个候选点的速度方差与流量方差，反映其对交通状态变化的敏感程度； C_i 为该点传感器布设成本； w_1, w_2 为权重系数，依据系统目标函数经多目标归一化确定。当 F_i 达到阈值 F_{th} 时，该位置视为关键监控点，优先纳入布设方案。

3.4 基于最短路径与行程时间标准差的布设优化算法

针对复杂道路网络的拓扑特性，本文提出一种基于最短路径约束与行程时间标准差最小化的布设优化算法，量化传感器位置与检测精度之间的耦合关系，实现空间分布的均衡与检测效益的最大化。该算法以道路网络节点间的行程时间波动为关键指标，依据交通流的时空连续性构建全局优化模型。设道路网络中任意两节点与之间的连通路径为 P_{ij} ，该路径由若干路段 L_k 构成，路段长度为 S_k ，车辆在该路段的平均行程速度为 V_k 。节点间的行程时间定义为：

$$T_{ij} = \sum_{k \in P_{ij}} \frac{S_k}{V_k}$$

行程时间标准差用于衡量交通状态的波动程度，其表达式为：

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in E} (T_{ij} - \bar{T})^2}$$

其中， \bar{T} 表示全网平均行程时间， E 为节点对集合， N 为样本数量。标准差越小，交通状态越稳定，传感器布设的检测效果越优。

算法流程分为三步：首先，依据道路网络的拓扑矩阵求解最短路径集 P_{ij} ，建立全局行程时间基线；其次，以节点间行程时间波动率为优化准则，计算不同布设方案下的行程时间标准差并迭代更新；最后，依据目标函数梯度收敛条件，筛选最优传感器节点集。该方法在保证关键路段交通状态高精度检测的同时，有效抑制冗余布设与数据重复采集问题，从而实现多传感器系统的协同最优布局。

4 结语

综上所述，本文以车路协同体系为背景，围绕智能路侧系统的多传感器布设优化、异构数据融合及边缘计算处理展开系统分析，深化了路侧感知在交通控制网中的功能

定位，构建了兼顾经济性与时效性的布设优化模型，为智能交通基础设施的高效感知与精准决策奠定理论依据。随着自适应传感器协同机制与高精度定位融合发展，应继续探索 AI 感知与边云协同体系的深度耦合，以期推动智慧公路与车路协同技术向更高层次发展。

参考文献：

- [1] 朱政泽, 熊宇恒. 基于多时空特征和图注意力网络的交通流预测模型研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025,44(10):51-59.
- [2] 王朝辉, 卢强, 王帅等. 用于道路自供能监测的微小变形大型压电装置设计与测试[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025,45(03):1-16.
- [3] 高健峰. 基于收费数据的高速公路交通状态预测及演变机理研究[J]. 中国交通信息化, 2025,(S1):153-156.
- [4] 樊鹏程. 面向高可靠低延迟应用的交通信息传输系统架构优化与性能分析[J]. 中国信息化, 2025,(02):44-46.
- [5] 黄海浪. 交通摄像机车牌识别技术应用困局分析与研究[J]. 长江信息通信, 2023,36(06):57-60.

作者简介：潘国强（1987.11-），汉族，山东济南人，本科，中级工程师，研究方向：主要从事智能交通研究。