 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i7.6693

Autonomous driving path planning and collaborative optimization of public transportation supported by satellite navigation

Nai Zhang

Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing, 100085, China

Abstract

With the full-scale deployment and widespread application of China's BeiDou Navigation Satellite System, autonomous driving in public transportation is advancing towards systematic development. Satellite navigation not only ensures precision for path planning and multi-vehicle coordination but also enables accurate positioning, trajectory constraints, and dynamic scheduling through high-precision spatiotemporal benchmarks. These capabilities allow autonomous vehicles to better handle complex road environments while ensuring safe and efficient passage. This paper conducts systematic research on path planning and collaborative optimization for public transportation autonomous driving under satellite navigation support, tailored to China's road characteristics. The study proposes relevant path planning methodologies and collaborative optimization techniques, providing theoretical foundations and technical guidance to further promote the implementation and large-scale application of autonomous driving in public transportation.

Keywords

satellite navigation; BeiDou satellites; public transportation; autonomous driving; path planning; collaborative optimization

卫星导航支撑下的公共交通自动驾驶路径规划与协同优化

张鼐

北京卫星制造厂有限公司，中国 · 北京 100085

摘　要

伴随我国北斗卫星导航系统全面建成及广泛运用，公共交通自动驾驶正迈向系统化发展之路，卫星导航一方面为路径规划和多车协同提供了精度保障，另一方面依托高精度时空基准可以进行精准定位、轨迹约束以及动态调度使自动驾驶车辆可更好应对复杂的道路环境，最终在保证安全的前提下实现高效通行。本文结合我国交通道路特点分别就卫星导航支撑下的公共交通自动驾驶路径规划与协同优化两方面展开系统性研究，并提出了相关路径规划的方法与协同优化手段，为进一步推动公共交通自动驾驶落地与规模化应用提供一定的理论基础和技术指导。

关键词

卫星导航；北斗卫星；公共交通；自动驾驶；路径规划；协同优化

1 引言

结合实践来看，我国北斗卫星导航系统在位置精度、时间同步和连续服务方面的优势，使其成为支撑公共交通自动驾驶的基础设施。在现有研究中，相关工作多集中于车载感知与局部环境建模，而对于依托北斗导航体系形成的系统级路径规划与协同优化方法探讨不足 [1]。有鉴于此，文章基于相关文献资料研究以及实践基础上针对卫星导航支撑下的公共交通自动驾驶路径规划与协同优化展开探讨，以供参考。

【作者简介】张鼐（1984–），男，中国北京人，本科，高级工程师，从事自动控制研究。

2 卫星导航支撑下公共交通自动驾驶路径规划

2.1 基于北斗高精度定位的固定线路轨迹约束

基于北斗高精度定位的固定线路轨迹约束是保证公共交通自动驾驶运行稳定的重要手段之一。前期建模时，应利用配备厘米级定位和姿态解算功能的高精度测绘车辆对整个目标线路进行测绘，收集路线包括道路中心线坐标、车道宽度、弯道曲率、纵坡参数、站点精准位置等在内的几何信息，并使用差分定位、多传感器融合手段构建高精度数字线路模型，以作为自动驾驶车辆行驶过程中的几何约束基准。自动驾驶车辆开动中车载北斗高精度定位终端与惯性测量单元进行紧耦合解算，借助实时差分改正数修正因卫星信号多路径效应与动态漂移带来的位置估计偏差，并结合预设数字化线路模型作为约束条件以及在车辆路径规划阶段嵌入

车辆行驶轨迹生成模块，进行纵向速度曲线和横向轨迹的优化处理。针对道路交叉口处、曲率突变区段及坡度变化处，导入轨迹规划算法中的几何边界条件及动态约束，如在道路交叉口利用设定虚拟控制点以实现转向轨迹的渐变约束；在坡度较大的路段设置纵向速度补偿模型以维持自动驾驶车辆动力学稳定状态；针对公交站点前的区间内嵌入分段减速轨迹与高精度停车窗口，实现不同的运行工况下自动驾驶公共交通车辆分层控制目的。最后把北斗连续定位解算结果和线路模型实时比较生成动态闭环校正机制，这让自动驾驶车辆行驶过程中实现偏移检测及修正，最终使得车辆实际运行轨迹与路径规划预测模型保持高度一致 [2]。

2.2 基于动态交通流预测的路径选择优化

基于动态交通流预测的公共交通自动驾驶路径选择优化需充分依托北斗卫星导航系统的高精度定位与时间同步能力，并结合城市交通感知平台的数据交互机制，构建面向群体调度的路径规划框架。在路径预测环节，利用北斗采集的车辆运行轨迹与时空基准数据对道路区段的平均速度、延误时长及流量演化规律进行建模，通过与城市道路检测器、视频监测单元及浮动车数据融合，形成分时段交通状态预测模型，实现对未来时域下道路通行能力的动态刻画。在路径生成阶段，系统依据预测结果对线路运行时效进行量化评估，对潜在拥堵风险路段建立多候选路径集，但在生成备用路径时需引入公共交通特定约束，即要求备用路径应该保证站点覆盖范围和原线方案完全相同，并且还要保证每条线路地理形状尽量能够与原线形一致，在满足人员上下车的基础上尽可能减少驾驶员绕行里程以及保证出行不受影响。运行控制阶段利用北斗高精度定位信息保障整个公共交通自动驾驶高效运行，一旦发现某路段发生运行延误达到阀值条件后，调度平台立即根据预先设定好的备用路径进行线路更换工作，并利用卫星链路向全部车辆发出一条调度命令来避免发生单车自行绕行引发后续交通混乱的情况。另外，路径选择优化时还可采取多车协同约束优化策略，即启用备用路径之后要根据线路运行间隔定期校准后方自动驾驶车辆间隔，以保证群体运行的时空一致性。总体而言，凭借着北斗卫星导航时控基准以及动态交通流预测对公共交通自动驾驶路径选择优化能够实现调度稳定性及精细化。

2.3 基于运营调度需求的时空路径编排

基于运营调度需求的公共交通自动驾驶路径规划必须在时空一致性约束下进行精细化设计，北斗卫星导航系统所提供的高精度时空基准在其中发挥核心支撑作用。具体而言，在路径生成阶段需要将车辆运行轨迹与运营时刻表进行严格耦合，即在轨迹优化模型中引入计划发车间隔、站点停靠顺序及计划到达时刻的多维约束，形成兼具几何可行性与时间一致性的路径解算结果。轨迹优化过程中可采用时空网络模型，将每一条候选路径离散化为时刻 – 位置对，并通过约束矩阵实现车辆轨迹与调度计划的绑定，以确保路径方案能够满足预设的调度节奏。在运行执行阶段，北斗系统的高精度授时能力保证了车队间时间基准的全局统一，系统通过实时对比车辆的动态位置与计划轨迹，一旦检测到时间偏差大于设定值，就通过速度控制模块动态调整路径的速度剖面，保持整个车流节奏的一致性。针对整个自动驾驶车队协同方式上，在进行路径规划时不仅要考虑单车路径最优化，还要考虑到多车时空队列约束问题，即在一些重要路口或者枢纽节点设置队列合流和分离的路线编排策略，在此过程当中还需要按照调度计划实现车辆的实时组、散编队，以保证自动驾驶车辆的编队运行秩序的持续性和灵活性。另外，为避免路径耦合所带来的交通碰撞风险，时空路径编排中还应在轨迹生成算法中引入北斗安全间距约束条件，利用位置和时间戳对相邻车辆之间的时空关系进行约束求解，在保证调度需求的前提下实现运行的安全性。综上所述，利用这个时空路径编排可以实现公共交通自动驾驶从轨迹生成 - 调度约束 - 运行修正的全过程的时空编排，并形成一种依托北斗系统的公共交通自动驾驶路径规划技术框架 [3]。

3 卫星导航支撑下公共交通自动驾驶协同优化路径

3.1 基于北斗授时的多车同步运行控制

基于北斗卫星导航系统的授时能力构建多车同步运行控制机制，是实现公共交通自动驾驶协同优化的关键环节。首先，在时间基准对齐方面，所有自动驾驶车辆需通过高精度北斗终端实现本地时钟与卫星信号的纳秒级同步，并通过车载时间同步模块将授时信号传递至车辆控制单元，以确保加速、制动、换挡及车联网通信的时序一致性。其次，在调度指令生成与下发过程中，中央调度平台基于北斗统一时标建立全局运行时序表，并将包括发车时刻、进站时刻、路口通过窗口期在内的多维时序参数，通过车路协同网络实时下发至各车辆终端；车辆需以北斗授时为参照进行自适应运行轨迹校正，当偏离时序表时由控制系统自动调节动力输出和减速度曲线，保持编队内部以及跨线路车流的运行一致性。再次，在枢纽路口的多线路交汇区域，车辆应依托北斗统一时标与车路协同控制算法建立分时通行机制，即在毫秒级时间片内完成不同车流的交替调度，保证各车队按照预设时间窗口无冲突穿越交汇口，同时车载控制器需在到达前完成基于授时信号的动态速度规划，从而确保进站与换乘环节的同步性。最后，在大规模公交网络运行条件下，需通过北斗授时驱动的分布式时钟同步机制，在不同车队、不同线路间维持跨区域的运行协调，并通过边缘计算节点对车辆运行时序数据进行局部校正与分发，使多车同步控制不依赖单一中心节点即可保持高精度时序一致性，从而形成全局统一的运行节奏与分布式调控体系。

3.2 基于道路资源共享的车辆协同调度

基于道路资源共享的车辆协同调度利用了北斗卫星导

航系统的高精度定位及轨迹连续性的优点，对公共交通自动驾驶车辆在复杂的道路环境下实现时空约束优化。具体调度过程为：首先使用北斗厘米级定位精度对自动驾驶车辆实时状态进行感知，然后由调度系统将各个车辆的位置、速度通过轨迹解算以及速度场拟合求得相邻两辆车上两点的距离以及速度的变化梯度，继而结合道路断面容量约束建立起车辆动态分配模型；如果当车道即将达到饱和状态后，可通过预测交通流强弱预判前方道路拥堵时刻，随后部分自动驾驶车辆在北斗导航下通过轨迹规划调整到备用路线行驶，以此来缓解局部路段流量，增加通行能力。当自动驾驶车辆行驶中遇驶入路口或瓶颈路段，通过北斗高频率定位数据变化率获得车辆精准的相对位置计算结果以掌握该区域内车流状况，随后通过北斗卫星向自动驾驶车辆下发各车辆通行速度指令，后者接收后按指令相应进行加减速，从而实现路口或瓶颈路段交替通行 [4]。另外，针对长距离公共交通自动驾驶协同上可借助于北斗卫星导航时序一致性对车辆通行进行跨区域同步控制，即对车辆行驶速度以及顺序予以协调，最终使得长距离自动驾驶车辆在道路资源共享条件实现高效通行。

3.3 基于换乘节点的跨线路协同优化

基于换乘节点的跨线路协同优化，需要依托北斗卫星导航系统的高精度时空基准，实现多线路公共交通自动驾驶在换乘枢纽处的精确协同调度。首先，在运行路径与时刻校准方面，以北斗授时为统一时间基准，对各线路车辆的到站时刻进行毫秒级同步校对，调度平台通过建立基于时空约束的运行曲线库，将不同线路车辆的行驶轨迹与预设时序进行比对，实现车辆运行路径在换乘节点的高一致性，避免因不同系统时钟差异导致的衔接偏差。其次，在动态进站秩序优化方面，依托北斗高精度定位信息，调度系统对接近换乘站点的多辆车进行队列预测与进站序列重构，通过基于时空约束的车 - 站匹配算法调整车辆进站先后顺序及停靠时长，避免高峰时段车辆过度集中引发的节点拥堵，同时保持跨线路换乘乘客的衔接时效。针对换乘时序预设与轨迹一致性控制环节，须基于换乘枢纽级别构建其跨线路换乘时序矩阵并依据公共交通工具运行时刻表、站点数量及分布等实际确定出最优的跨线路换乘路径衔接机制。随后再利用北斗卫星实时轨迹监测控制公共交通工具行驶速度以及进站时刻，以促使公共交通自动驾驶车辆实际运行和预设时序二者容差处于阈值内 [5]。最后，在异常扰动下的跨线路协同修正方面，当单条线路发生延误时，调度系统基于北斗监测信息实时计算受影响的跨线路换乘链条，通过对相关线路车辆运行速度的区间调整、进站缓冲时间的再分配以及停靠顺序的动态切换，保持整体换乘时序的连续性与稳定性，从而实现多线路公共交通自动驾驶在复杂换乘环境下的高精度协同运行。

4 结语

综上所述，随着科学技术飞速发展背景下自动驾驶技术正成为推动交通转型升级的重要力量。当前，全球自动驾驶技术正处于快速发展阶段 , 展现出“智能化升级、场景多元化与产业加速”三大趋势。而公共交通自动驾驶的发展正在从实验验证迈向示范运行阶段，其中路径规划与多车协同是其能否在城市交通网络中稳定运行的关键。上文在充分结合我国北斗卫星导航系统实际情况针对公共交通自动驾驶在路径规划与协同优化展开了系统性探究。今后，在北斗卫星导航及自动驾驶技术更进一步发展推动下，公共交通自动驾驶路径规划与协同研究可逐渐深入到更为复杂交通运行场景提升其多源融合与系统级调度能力，从而全面提升公共交通自动驾驶的运行效率与服务水平。

参考文献

[1] 吕万钧.车路协同条件下自动驾驶公交运行控制策略与算法研究[D].北京交通大学,2023.

[2] 刘聪健,章步镐,罗鹏,等.人机混驾场景下城市快速路自动驾驶专用道环境可持续性评估与优化[C]//第十九届中国智能交通年会科技论文集.2024.

[3] 董玮 李岩 郭宏伟 渠谨黛 董良.无信号交叉口自动驾驶汽车协同驾驶策略研究[J].交通科技与管理, 2024.

[4] 应申,蒋跃文,顾江岩,等.面向自动驾驶的高精地图模型及关键技术[J].武汉大学学报（信息科学版）, 2024, 49(4):506-515.

[5] 张华,王钊桐,罗伟坚,等.自动驾驶融合感知定位精度的验证测试[J].汽车与新动力, 2024, 7(5):21-24.