

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.001

基于卫星导航的铁路列车控制系统 自主定位技术研究进展

刘江^{1,2,3}, 蔡伯根^{1,3}, 王剑^{1,2,3}, 陆德彪^{1,2,3}, 姜维^{1,2,3}

1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;
2. 北京交通大学智慧高铁系统前沿科学中心, 北京 100044;
3. 北京市轨道交通电磁兼容与卫星导航工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 基于卫星导航的车载自主化列车控制是智能铁路技术体系的关键组成部分。对中国列车控制系统体系架构进行了梳理, 分析了列控专用列车自主定位基本结构及与列控系统的接口模式。结合列车运行控制对安全性的特定需求, 探讨了列车自主定位性能需求体系, 介绍了国内外基于卫星导航的新型列车控制系统的发展情况, 阐述了列车自主定位技术内涵及主要研究进展, 从多源感知融合无缝定位、列车卫星定位主动增强、定位专用轨道地图数据库、自主定位性能测试评估等多个方面进行了全面系统的梳理和分析, 介绍了伪卫星增强列车定位、轨旁卫星定位增强网络、地理分布式零现场虚拟测试设施等典型成果, 并对前沿技术运用演进、关键场景融合优化、复杂环境安全防护、跨层协同全息感知、专用标准规范体系等未来发展方向进行了展望。

关键词: 卫星导航; 铁路运输; 列车控制; 自主定位; 安全定位

中图分类号: U284

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2023)04-0001-23

Research progress on autonomous positioning of satellite navigation-based railway train control system

LIU Jiang^{1,2,3}, CAI Baigen^{1,3}, WANG Jian^{1,2,3}, LU Debiao^{1,2,3}, JIANG Wei^{1,2,3}

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Frontiers Science Center for Smart High-speed Railway System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Train-borne autonomous train control based on satellite navigation is a key component of the intelligent railway technical system. The system architecture of Chinese Train Control System (CTCS) is investigated. The fundamental structure of dedicated autonomous train positioning and its interface mode to the train control system are analyzed. According to the specific requirement to the safety level of train control, the performance requirement system of autonomous train positioning is discussed. With the introduction of the worldwide development of novel train control systems, the technology connotation and the research progress of autonomous train positioning are explained. A comprehensive and systematic analysis is carried out from the perspectives of

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-07-13

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国国家铁路集团有限公司铁路基础研究联合基金(U2268206); 国家自然科学基金(T2222015); 北京市自然科学基金(4232031); 国家重点研发计划课题(2022YFB4300501)

作者简介: 刘江(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事轨道交通控制、卫星导航定位、智能信息处理等方面的研究。

seamless positioning by multi-source fusion, active augmentation of satellite-based train positioning, positioning-dedicated trackmap database, and autonomous positioning performance test and evaluation. Typical achievements such as pseudolite-enhanced train positioning, track-side global navigation satellite system (GNSS) augmentation network, and geo-distributed zero-on-site virtual test infrastructure are introduced. The future development directions are proposed, including advanced technology implementation and evolution, fusion optimization for significant scenarios, security protection under complex environments, cross-layer cooperative holographic perception, dedicated standard and specification system, etc.

Key words: Satellite navigation; Railway transportation; Train control; Autonomous positioning; Safe positioning

0 引言

作为国民经济的大动脉、国家层面的重要基础设施和大众化的交通运输工具,铁路运输在经济社会发展中具有至关重要的地位和作用。安全,是铁路运输系统一切活动行为的首要前提。列车作为承载铁路客货运输任务的核心主体,与其运行过程直接相关的列车控制系统(简称“列控系统”)承担进路方向、追踪间隔、运行速度等控制与防护任务,是确保行车安全、提高运输效率的核心技术装备,是铁路运输系统的“大脑和神经系统”。在安全防护功能中,列车位置、速度、轨道占用等运行状态的感知决策是一项极为基础且关键的功能需求。当前的普速、高速铁路以及城市轨道交通均依赖轨旁设施(如沿线布设的应答器、轨道电路等装置)与车载自主定位方式相结合来实现列车运行状态感知,面临着功能自主性不足、灵活性受限、建设维护成本高昂等突出问题。为此,引入新型智能化技术途径,在降低轨旁设施依赖条件下,由车载设备自主实施测速定位,通过虚拟应答器等方式确保其应用实施的适配度与可行性,作为国内外轨道交通运营管理机构从更高层次的“全生命周期”成本效益优化角度出发的必要选择,运用既有系统的安全性设计思想及安全评估认证机制使其满足相关安全需求,已成为列车控制技术的关键发展导向。

近年来,随着全球科技创新和轨道交通系统智能化的快速发展,以大数据、云计算、人工智能、北斗卫星导航等为代表的新兴技术不断迭代更新,为智能铁路体系的构建与发展提供了重要机遇^[1-2]。卫星导航系统作为国家层面的重大战略基础设施,在国民经济的各个方面均已发挥了关键作用,GPS、GLONASS、Galileo 以及我国北斗卫星导航系统的

发展完善,及全天候、全天时、高覆盖的特性,使其能为铁路运输系统的智能化提供重要支撑。德国、意大利、法国、美国、英国、日本等多个国家均已开展了卫星导航在智能铁路业务方向的深度融合研究,以卫星定位驱动及多源车载信息融合实施列车自主定位,实现以“车载自主化”为目标的新型列车控制系统,经过 20 余年的发展,已逐步进入技术规范探索^[3]、系统装备研制^[4]、现场工程示范^[5]等实质阶段。

我国铁路列车控制技术在中国列车控制系统(Chinese train control system, CTCS)体系框架下不断完善,已开始进一步开展高等级 CTCS-4 级列控系统的研发探索。在 CTCS-4 级系统模式下,列车定位不再依赖轨旁设备实现测速测距误差校正。由车载定位装置自主决策列车位置与占用状态,已成为国内外列控技术领域的共识^[6]。自 2020 年以来,我国自主建设的北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)开通全球服务,为列车定位模式展现技术、资源层面的高度自主化提供了重要支持。新型列控系统将不断推进技术规范、装备研制及现场运用,以“故障—安全”这一核心特性基础上的更高自主化、更加智能化、更广适配化为目标,对卫星定位的高效融合运用注入了新的发展内涵。

鉴于此,对近年来基于卫星导航的列车控制系统自主定位技术方面的研究进展进行综述,对未来深化发展面临的挑战和发展方向进行了展望。本文的主要框架如下:第一部分介绍了基于卫星导航的列车控制系统架构,分析了列车自主定位的基本结构和技术思路;第二部分介绍了列控系统自主定位需求,对比了不同国家、不同交通控制模式对自主定位的量化需求体系;第三部分综述了列车自主

定位的关键技术,分别从融合、增强、约束、评估等四个方面对国内外研究的主要进展进行了总结;第四部分结合新时期新型列控系统的发展及运用趋势对列车自主定位技术发展方向进行了展望。

1 基于卫星导航的列车控制系统架构

列车运行控制系统是根据列车在铁路线路上运行的客观条件和实际情况,对列车沿轨道运行速度及制动方式等状态进行监督、控制和调整的技术装备,是保障行车安全的核心。自 20 世纪 90 年代美国“主动列车间隔控制(positive train separation, PTS)”计划开创了卫星导航系统在铁路列车定位的应用以来,美、欧、日等在基于车载自主定位的列车运行控制系统领域取得了进展。美国 GE 公司的增强型列车控制系统(incremental train control system, ITCS)已成功在我国青藏铁路、澳大利亚等得到使用,实施的“北美联合精确列车控制(North American joint positive train control, NAJPTC)”计划以及“全国范围差分 GPS 系统(nationwide differential global positioning system, NDGPS)”的构建,为进一步提升卫星定位在列车运行控制领域的应用能力提供了重要基础。欧盟伴随其 Galileo 卫星导航系统建设发展,高度重视列车控制这一应用方向,启动了“区域欧洲铁路管理系统(European rail traffic management system regional, ERTMS regional)”“低成本欧洲列车控制系统(European train control system-low cost, ETCS-LC)”等计划^[7],研

发兼容于 ERTMS/ETCS 且适合于低密度低速线路列控系统改造升级的低成本系统方案,并为 ETCS-3 级系统研发打下了基础,先后支持了多项研发计划,对卫星定位列控应用的方法、技术与标准进行探索^[8]。2013 年,欧盟在原有 ETCS 列控体系上提出“下一代列车控制(next generation train control, NGTC)”研究计划,重点研究基于卫星导航系统的列车自主定位等关键技术,进一步提升铁路运输能力及自动化水平,降低设备安装、维护成本,提高可靠性^[9];启动“构建未来铁路系统联合行动(Shift2Rail)”计划(2021 年拓展为 Europe’s Rail 计划^[10]),设立了“先进的运输管理和控制系统”方向,通过引入卫星定位、新型通信、虚拟连挂等先进技术,形成高度集成化的通信与控制体系结构,进一步提高铁路运输效率、增强系统可靠性、降低系统运营成本^[11]。日本于 2008 年提出下一代轨道交通方案,设计了先进列车管理和通信系统(advanced train administration and communication system, ATACS)、下一代铁路运营系统(next-generation railway operation system, NGROS),提出新型列控系统结构,通过使用 GPS 实现列车定位、减少地面设备,达到降低运营成本、提高线路运行效率的目的^[12]。我国铁路自 21 世纪初开始建立中国列车控制系统体系^[13],如图 1 所示,共划分为 5 个等级,其中,CTCS-0、CTCS-1 级主要面向时速 120 km 和 160 km 既有线,CTCS-2 和 CTCS-3 级列控系统直接面向时速 250 km 和 350 km 高速线路,在确保列车运行安全方面

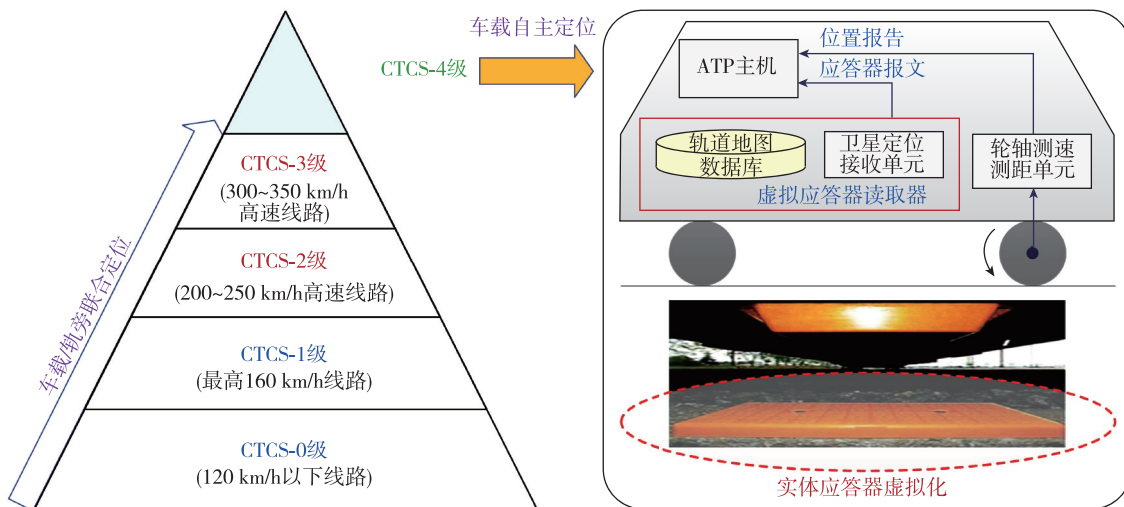


图 1 中国列车控制系统体系及新型车载自主定位接口模式

Fig. 1 CTCS framework and interface mode of novel train-borne autonomous positioning

已有成熟运用。总体来看,各应用等级系统基本结构可划分为车载设备、轨旁设备、中心设备三个部分,对于CTCS-4级列车控制系统,发挥卫星定位的优势,将其与车载设备所含辅助定位传感器、轨道地图数据库所提供的多信息源进行融合,从而具备“车载自主化”能力,向车载列车超速防护(automatic train protection, ATP)主机提供基础信息,能够在列车运行状态感知层面有效简化轨旁设备,仅由列控车载设备通过多源信息融合实施测速定位与状态估计。

本文给出基于卫星导航的新型列控系统列车自主测速定位的一种基本结构方案,如图2所示,其中,在预留应答器信息接收单元(balise transmission module, BTM)提取应答器信息的基础上,ATP设备通过四类部件/单元实现列车位置与运行状态的估计决策:

1) 轮轴测速测距单元:由安装于轮轴的速度传

感器采集车轮在一定周期内的转数,换算估计列车的走行距离,并估算列车在一个周期内沿轨道方向的纵向运行速度;

2) 卫星定位接收单元:接收来自卫星导航天线的信号并实施信号处理与三维位置解算,若轨旁系统配置差分定位增强系统,则单元在解算中会包含对经由无线通信单元发送的差分校正信息的利用,以提升定位精度及完好性水平;

3) 电子地图单元:存储并更新列车运行区段的定位专用轨道数据库信息,用于对卫星定位接收单元所得坐标位置向沿轨道一维纵向相对距离量的转换;

4) 辅助定位传感器:采用非卫导定位传感器(如多普勒测速雷达、惯性测量单元、超宽带定位单元等)对隧道、封闭或带顶棚站场、高路堑等环境中因卫星信号遮挡导致定位可用性缺失、性能劣化等情况进行补偿,实现多源融合解算。

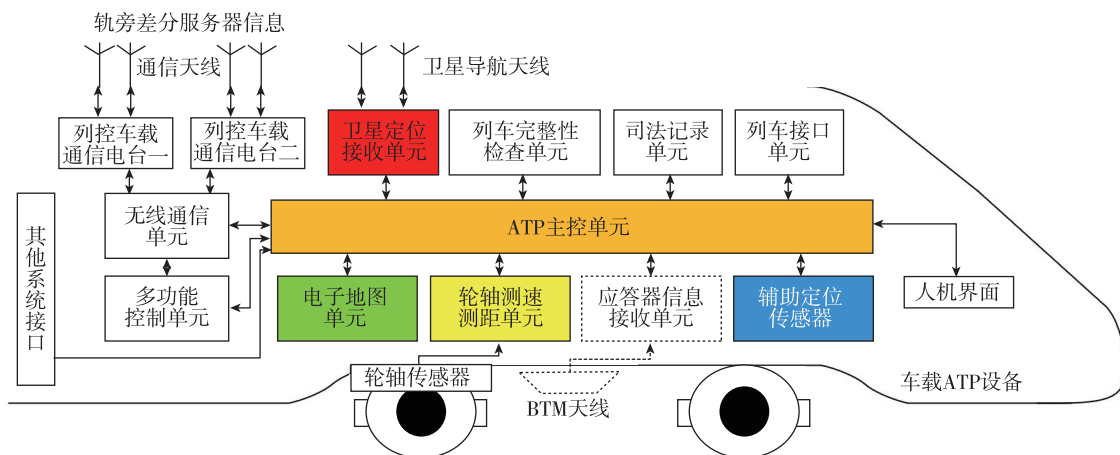


图2 新型列控系统基于卫星导航的列车自主定位基本架构

Fig. 2 Fundamental framework of GNSS-based autonomous train positioning in the novel train control system

车载ATP设备获取各类传感器及电子地图数据库信息后,为确保卫星定位解算所得位置信息用于生成列车控制指令,如运行授权(moving authority, MA),能够具备与既有列控系统兼容的接口形式,降低引入卫星定位造成的系统架构调整对符合系统规范与通过安全评估可能带来的差异化影响,国内外均运用了虚拟应答器(virtual balise, VB)的接口机制^[14]。卫星定位结果用于实现应答器功能的虚拟化,在利用定位估计解与拟布设应答器位置实现对准与捕获的情况下,调取数据库存储的应答器报文发送至ATP主控单元,可实现与在线路上真实安装应答器设备并在列车通过时激励报文一

致的效果。随着虚拟应答器布局^[15-16]、定位解算^[17-18]、虚拟应答器捕获^[19-22]、捕获质量评估^[23]等相关关键技术的不断完善,基于虚拟应答器的卫星定位接口兼容模式,已成为国内外众多基于卫星定位的新型列控系统的普遍选择。

从上述结构可以看出,新型列控系统通过传统轮轴测速测距方式基础上,引入卫星定位及其支撑性信息源(如电子地图、辅助定位传感器等),能够实现对轨旁应答器的替代,由车载设备自身的信息条件主动自主实施定位校正,从而降低对轨旁设施条件的依赖,为进一步简化列控系统结构、动态分配调整系统功能提供支持。新型列控系统的定

位感知模式可用于高速、普速及广大中西部稀疏路网铁路线路,其所需的车载/轨旁/中心设备条件配置及与既有设施水平的有效适配过渡是制约其运用的主要因素,此外,等级间切换与兼容化也是实施运用面临的主要问题。卫星定位的核心使能性作用是欧盟 ETCS-3 级、我国 CTCS-4 级、美国 PTC 等新型列控系统架构的共同选择,也是进一步促进列控系统“故障—安全”原则基础上开展需求、关键技术等方面研究的主要驱动点,支撑国内外研究人员在此方向开展了大量研究工作。

2 列控系统自主定位性能需求体系

卫星导航系统的性能指标自 GPS 实现完整操作能力以来,周期性更新标准定位服务、精确定位服务以及增强服务的性能标准。导航系统标准定位服务(standard positioning service, SPS)将空间信号(signal in space, SIS)服务的覆盖范围、定位精度、信号完好性、信号连续性以及信号的可用性列为 GPS SIS 性能评估指标^[24],这是进行卫星定位铁路应用的基础。欧洲 Galileo 系统在设计之初公布了系统的高水平性能定义(high level definition, HLD)文件,分析了用户、运营及服务操作方的需求,提出 Galileo 应用的性能要求下的量化指标,其中,列车运行控制从属的安全相关服务的需求在

GPS SPS 标准的基础上将完好性评估描述为 3 个子参数:报警门限、报警时间以及完好性风险^[25]。我国发布的《北斗卫星导航系统公开服务性能规范》进行了多次更新^[26],对空间信号覆盖范围、精度、连续性、可用性规范以及定位导航与授时服务精度、服务可用性等指标进行了定义,尚无特定针对安全相关应用的性能指标要求。

近年来,伴随铁路系统关键应用中 GNSS 的不断深化,考虑到列车运行控制等与安全紧密相关系统的安全需求与卫星定位面临的系统级、信号级、用户端风险,欧美多国在引入卫星定位构建新一代基于列车自主定位的新型列控系统过程中,均结合卫星导航系统相关性能体系,设计了面向铁路特定应用的性能需求量化方案。

早在 2000 年,欧盟 GNSS 秘书处即已组织欧盟委员会相关部门、铁路运营单位、铁路/公共交通组织机构、客货运公司、运输服务商、GNSS 设备商等,按照铁路干线/车站、中密度线路、低密度线路 3 类场景,构建铁路专用装备应用中 Galileo 定位服务的性能需求体系^[27]。2019 年,欧洲 GNSS 管理局(European GNSS Agency, GSA)发布了 GNSS 铁路用户需求报告^[28],进一步针对与列车运行相关的 6 项安全应用进行了量化需求总结,如表 1 所示,为其他国家构建规范化的量化需求体系提供了重要参考。

表 1 欧盟 GNSS 铁路安全相关应用量化性能需求^[28]

Tab. 1 Quantitative performance requirement of safety-related railway GNSS applications in Europe

安全应用类型	精度 $2\sigma/m$	可用性	完好性	安全完整性等级(SIL)	告警时间/s
未上电运行检测	<1 (水平误差)	高	非常高	4	<10
道口防护	1~10 (水平误差)	高	非常高	4	<10
列车完整性检测	1~10 (水平误差)	高	非常高	4	10~30
股道占用识别	<1.9 (垂直轨道误差)	高	非常高	2~4	10~30
车门控制监督 (列车自动运行)	1~10 (水平误差)	高	高	2	10~30
轨旁人员检测	1~10 (水平误差)	高	高	/	10~30

随着欧盟在深化 Galileo 在欧洲铁路管理系统/欧洲列车控制系统(European rail traffic management system/European train control system, ERTMS/ETCS)中的应用,结合列控系统对安全完整性等级(safety integrity level, SIL)要求,欧盟在地平线 2020 框架下支持了 Helmet 计划,旨在将列车运行控制中 GNSS 的应用模式复用至道路交通自动驾驶等多模领域,从而

使道路车辆、列车等交通载体更为经济化,共用定位基础设施、安全评估认证机制^[29]。表 2 给出了该计划对列车、自动驾驶汽车运用 GNSS 实施安全控制不同场景、等级条件下的量化需求对比,体现了铁路安全控制领域卫星定位应用的示范延伸效应,为进一步明确卫星定位性能指标、扩展 GNSS 在交通载体工具控制系统应用提供了有效参考。

表2 卫星导航系统铁路/道路用户需求对比^[30]

Tab. 2 Comparison of GNSS user requirements between road and railway applications

领域	场景用户需求	完好性/ (h ⁻¹)	95%可靠性下, 不同方向的精度/m		不同方向的 告警限值/m		告警时间/s	可用性	连续性	安全性
			横向	纵向	横向	纵向				
铁路	股道区分识别	<1e ⁻⁹	0.70	/	1.7	/	10~30	高	/	极高
	里程估计校正	<1e ⁻⁹	/	0.70	/	1.7	<1	高	/	极高
	未上电运行检测	<1e ⁻⁹	/	2	/	5	<10	高	/	极高
道路	干道自动驾驶	<1e ⁻⁶	0.27	4.50	0.67	11	1	>99.5%	高	极高
	区域道路自动驾驶	<1e ⁻⁶	0.17	0.40	0.42	1	1	>99.5%	高	极高
	狭窄/弯道自动驾驶	<1e ⁻⁶	0.07	0.11	0.17	0.30	1	>99.5%	高	极高

美国在世界范围内最早构建 GNSS 系统并将 GPS 引入列车控制等关键应用,多年以来持续强化基于卫星导航的 PTC 体系,由美国国防部、交通部、国土安全部联合多年发布《联邦无线电导航计划》^[31],在定位导航与授时(positioning, navigation and timing, PNT)用户需求部分,对包括主动列车

控制在内的 6 类典型铁路应用引入 GPS 及 NDGPS 系统所需性能指标,如表 3 所示。近年来,随着美国联邦政府要求下对 PTC 计划安全规划(safety plan)进程的逐步落实及 PTC 安全技术需求的适配,PTC 体系中卫星定位的性能需求体系也逐步完善。

表3 美国 PTC 系统卫星导航应用量化性能需求^[31]

Tab. 3 Quantitative performance requirement of GNSS-based PTC system in USA

需求	精度(2DRMS)	可用性/%	完好性告警门限	告警时间/s	覆盖率
列车运行控制	1.0 m	99.9	2 m	6	50 个州和哥伦比亚特区正线
轨道缺陷定位	0.3 m	99.9	0.6 m	30	50 个州和哥伦比亚特区正线
自动资产绘图	0.2 m	99.9	0.4 m	30	50 个州和哥伦比亚特区正线
测绘	0.02 m	99.7	0.04 m	30	50 个州和哥伦比亚特区正线
桥梁监测	0.002 m	99.7	0.004 m	30	50 个州和哥伦比亚特区正线
通信授时	340 ns	99.7	680 ns	30	50 个州和哥伦比亚特区正线

卫星定位使能的铁路应用近年来在广度方面得到不断扩展,然而,目前尚未形成体系化的针对卫星定位的专用标准规范。列车控制系统作为一类特征显著的安全相关应用,引入卫星定位赋予了系统结构与内涵的新特征,但其在铁路安全服务体系下需要遵守 EN 50126^[32]标准对电子设备铁路应用可靠性、可用性、可维护性和安全性(reliability, availability, maintainability and safety, RAMS)技术条件的要求^[33]。基于上述两个不同领域的性能评价体系,研究人员利用统一建模语言(unified modeling language, UML)结构化表述方法对卫星导航在交通安全应用场景下的性能指标进行了对比分析^[34]。在常规 GNSS 自身性能指标体系与铁路 RAMS 体系之间的映射关联方面,研究人员已开

展了多项研究,如:利用三角分割方法将卫星导航系统性能分解为可靠性与非可靠性,构建了卫星导航系统和功能安全标准中连续性、可靠性、安全性三个性能指标间关系的形式化描述方法^[35];对卫星定位观测量质量分级(包括正常、退化、故障),建立以精度为基础的 RAMS 指标量化评估^[36-37];结合危害分析与 Petri 网建模^[38]、可信性/安全性分解^[39]等手段开展 RAMS 基于仿真的评估分析。在整体指标体系层面,已逐步构建了列车定位性能指标体系映射关系模型,如图 3 所示,从可靠性与安全性的关系及故障检测诊断状态空间入手,形成了基于卫星导航的列车定位性能指标体系关系描述^[40],为设计、研发、测试、评估提供了指导依据。

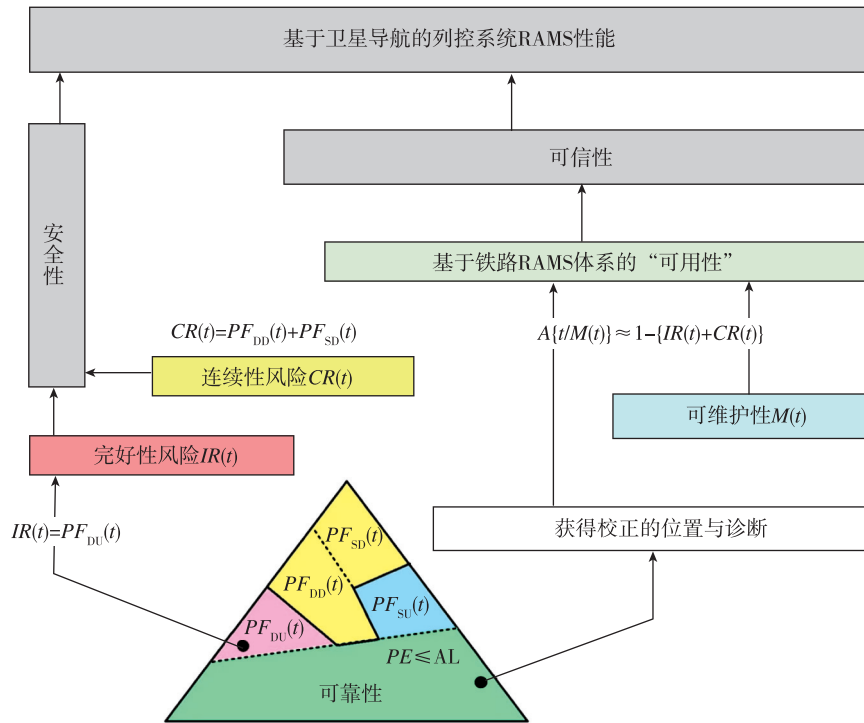
图 3 基于卫星导航的列车定位性能指标体系映射关系模型^[41]

Fig. 3 Performance index system mapping relationship model for GNSS-based train positioning

随着基于卫星导航系统的列车控制技术逐步朝向装备应用层次发展,针对列车自主定位及整体新型列控系统级的标准规范体系将进一步完善,相应的需求体系、指标框架、评估策略将为相应方法、技术的研究与应用提供更为明确的规范化约束。

3 基于卫星导航的列车自主定位研究进展

列车运行于固定轨道,以列车相对参考点(一般用最邻近相关应答器组(last relevant balise group, LRBG)为参考点)的走行距离作为位置描述,具有典型的一维特征,考虑到列车控制的安全需求,列车位置的估计还需充分考虑测量、解算中的不确定性。为此,针对基于卫星导航的列车自主定位,如图 4 所示,主要从 4 个方面描述定位的核心内容。

(1)融合:为解决导航卫星信号受限可能导致的性能劣化与功能失效,引入非卫导信息源对自主定位性能进行补偿与优化,提升对不利、恶劣卫星导航观测条件的适应。

(2)增强:为确保定位性能满足上下行股道区分、列车追踪间隔估计等需求,在卫星定位自身的增强方面,引入系统化手段(如轨旁 GNSS 增强设施)、处理层机制(如自主完好性监测逻辑),实现对卫星定位性能的保障。

(3)约束:为充分挖掘列车位置描述受轨道物理“约束”这一特性的作用,在充分运用卫星定位及辅助定位信息实施定位决策过程中,引入轨道空间信息提供的先验知识条件,在实现一维沿轨道位置描述转换基础上进一步优化定位性能。

(4)评估:为了满足自主定位应用支撑列车控制达到“故障—安全”原则要求,建立特定测试评估体系与环境,对各类场景条件下列车自主定位的性能及可信水平进行检验。

为此,本文以此 4 个要点为索引,以国内外列车控制系统的建设发展及应用为背景,对列车自主定位的主要研究进展情况进行梳理与总结。

3.1 多源感知融合无缝定位

在庞大复杂的铁路网中,卫星定位将面临多样的运行环境及工作条件,导航卫星空间信号的可用性限制(如车站、隧道等环境中严重的信号遮蔽)会对定位性能形成极大制约,如何实现受限观测条件下定位的无缝化优化是一项关键瓶颈。为了确保列车定位在不同场景下实现定位接入的无缝衔接,采用合理途径实施多源定位信息融合是这一领域长久以来始终关注的主题。常规可用于实施多源定位融合的候选列车定位方式包括惯性导航、多普勒测速、轮轴测速定位、蜂窝无线通信等^[42]。近

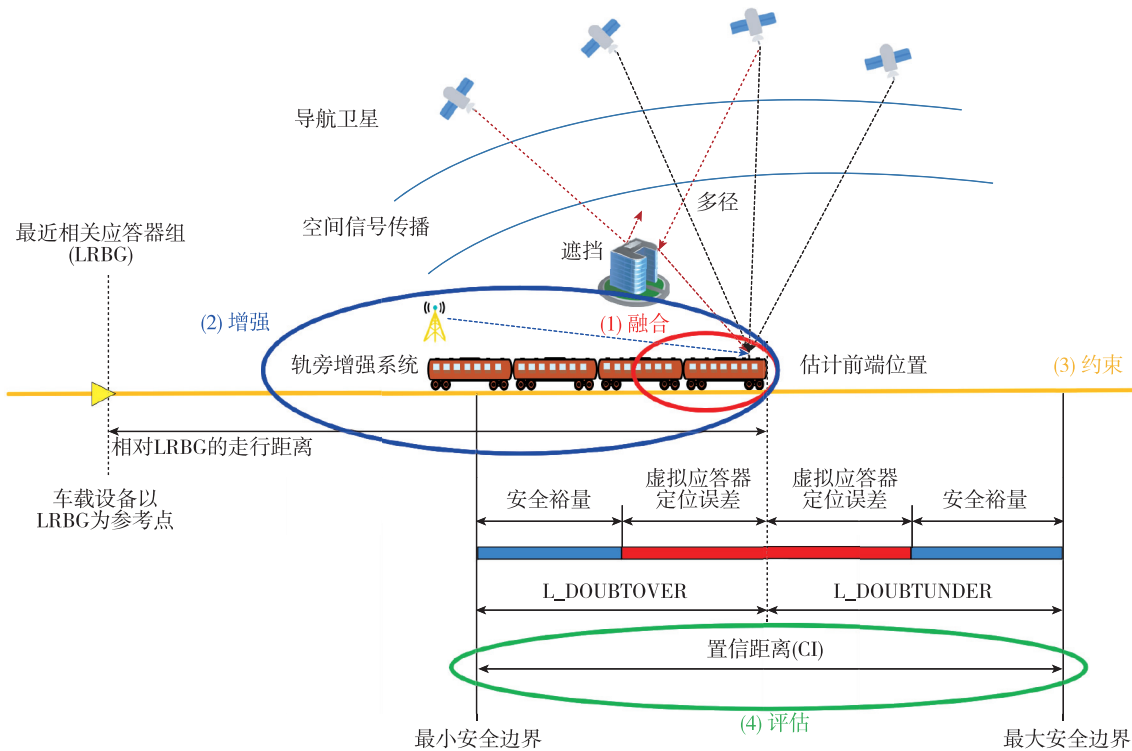


图4 基于卫星导航的列车自主定位技术内涵分解

Fig. 4 Technology connotation description of GNSS-based autonomous train positioning

年来,集成涡流、视觉、激光雷达、超宽带、光纤光栅等多种新型方案的涌现,为列车自主定位提供了更为广阔的融合空间。

在多传感器组合结构下,滤波估计是利用多源信息进行准确状态判定的重要途径^[43]。近年来,针对Kalman滤波框架下各类方法因非线性、非高斯等问题导致的性能受限问题,基于新型贝叶斯估计的组合定位已形成众多成果。Malleswaran M.等^[44]提出了IMM-UKF-TFS(interacting multiple model-unscented Kalman filter-two filter smoother)模型,利用平行滤波器对GNSS与惯性导航的组合系统进行实时估计,使融合定位信息更加平滑;Minetto A.等^[45]提出基于次优粒子滤波(suboptimal particle filter, S-PF)的组合定位融合算法,相对传统EKF方法实现了显著的定位性能优化;Heirich O.等^[46]利用粒子滤波与贝叶斯估计相结合提高列车定位精度,通过粒子滤波减少线性化过程中的误差,提高定位精度、稳定性和鲁棒性。在传统贝叶斯估计框架之外,因子图优化(factor graph optimization, FGO)作为一种新型融合估计架构,在状态估计的鲁棒性水平以及处理观测量非高斯特征方面表现出更优性能^[47],已有研究开始将FGO引入多源列车融合定位实现对基于GNSS的列车定位受限环境补偿^[48]、多源融合性能优化^[49]。此外,随

着人工智能技术在导航定位领域的不断渗透,以群体智能优化、神经网络深度训练、机器学习等前沿技术为支撑的非线性非高斯滤波估计算法也已用于卫星定位与辅助传感器的融合^[50-52],对滤波性能在实际定位中存在的非线性、随机性进行补偿和优化^[53],为列车定位提供了更多选择。

除采用非卫导信息对GNSS定位实施优化,伪卫星(pseudolite, PL)技术为无缝列车定位提供了另一路线。伪卫星发射与GNSS导航信号相同或相近的信号,提供定位、导航与授时服务,作为解决卫星信号受到遮挡无法定位问题的有效途径之一,已经成为了近年导航定位领域的热点^[54]。面向列车定位,欧盟RailGATE测试场^[55](railway Galileo test environment)构建了世界上唯一面向GPS/Galileo铁路应用的伪卫星研发测试环境,安装有8台伪卫星信号发生器、2个监控站、1个数据处理中心,信号覆盖整个环形测试区域,支持200 km/h的动态测试。结合RailGATE在增强卫星星座方面的基础,在列车自主定位方案中引入伪卫星,构建包含空间导航卫星、轨旁差分基站、地面伪卫星在内的“空地一体化增强卫星星座网络”(如图5所示),能为导航卫星定位服务形成无缝化延伸,强化GNSS技术应用于列车控制等安全相关系统的能力条件。

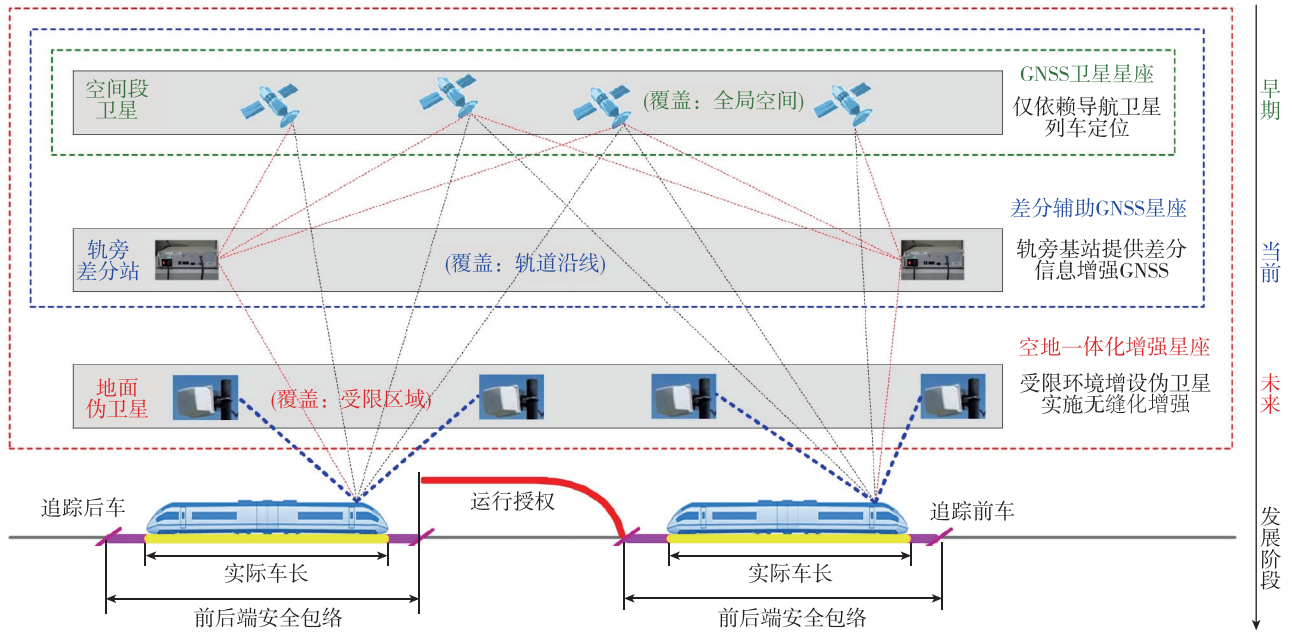


图5 导航卫星/差分基站/伪卫星空地一体化增强卫星星座网络架构

Fig. 5 Integrated architecture of the augmented satellite constellation network based on GNSS satellites, DGNSS reference stations and pseudolites

伪卫星时间同步、多径/远近效应抑制、高精度高可靠解算、设备低成本化等问题尚有待解决,其与多定位源实施组合所能达到的效果已得到充分验证^[56]。在引入伪卫星实施列车定位无缝化增强方面,近期研究集中在铁路场景适用性分析、伪卫星布局方案、定位风险辨识等方面,代表性成果包括:伪卫星、北斗导航联合无缝定位观测模型^[57];基于群智能优化的铁路站场伪卫星选址布局策略与车站站场空间特性关联方案^[58-59];以完好性为依托,设计导航卫星、伪卫星联合用于无缝定位的完好性监测方法,对伪卫星引入无缝定位实施风险评估^[60];基于无缝定位的虚拟应答器列控系统接口方法^[61]。随着伪卫星技术的不断完善、专用布局/解算/融合/测试/评估等方法的不断丰富,在铁路特定区域实施伪卫星部署增强,构建面向铁路网线的GNSS/PL综合空间星座条件,将会形成更为显著的列车自主定位无缝化保障效应。

3.2 列车卫星定位主动增强

在一定时期和技术条件下,由于尚不具备类似星基增强等完全摆脱轨旁依赖的增强技术手段,铁路卫星定位应用普遍引入差分定位技术,以有限的相关设施(如差分基站、处理中心等)建设维护成本实现对车载定位性能的优化。新型列控系统提供差分卫星定位的相关设施纳入总体框架,由专用差分基站、承

载于列控轨旁/中心设备的增强服务等,使系统具备对卫星定位的主动增强能力。近年来,世界多国在建设发展基于卫星导航的新型列车控制系统进程中,均将卫星定位的主动增强作为自主定位能力优化的重要途径^[62]。表4总结了国内外基于卫星导航的列控系统定位增强技术实施情况。

欧洲较早开展了面向ETCS-3级模式的列车自主定位技术研发,形成符合SIL-4要求和ERTMS标准的列车定位系统架构,包含车载定位、轨旁增强、无线传输3个子系统。图6给出了典型的包含专用轨旁GNSS增强网络的列车自主定位架构^[63]。核心是轨旁增强网络,运用专用卫星定位差分基站,复用列控系统中心设备(如图6所示无线闭塞中心(radio block center, RBC)),提供GNSS增强认证,已在意大利撒丁岛50km试验线进行验证^[64]。我国自2018年以来启动了基于北斗的新型列车控制系统研制计划,设计了GNSS参考站、差分服务控制中心、列控资源管理单元三级架构的轨旁增强网络方案,采用通过互联网进行RTCM网络传输的协议(networked transport of RTCM via internet protocol, NTRIP)与铁路信号安全协议-1(railway signal safety protocol-1, RSSP-1)确保增强系统信息安全,并采用蜂窝通信、卫星通信联合确保差分增强数据播发质量,2021年于青藏铁路公司管内哈

表4 国内外基于卫星导航的列控系统定位增强技术实施情况对比
 Tab. 4 Implementation status comparison of positioning augmentation technology
 in GNSS-based train control systems at home and abroad

要点	欧盟	美国	中国
增强模式	欧洲地球静止导航重叠服务(EGNOS)+轨旁差分增强	差分基站实施定位增强,推广NDGPS增强服务	轨旁差分增强,考虑引入北斗专用地基/星基增强
技术路线	基于GNSS实现虚拟应答器(VB)与列控系统互操作,轨旁设差分增强网络	GPS/轮轴传感器数据融合,引入轨道地图数据库实施定位决策	北斗/GPS/辅助传感器组合,引入轨道地图数据库、轨旁差分辅助
实施进程	已构建基于卫星导航的列控系统成套装备,在意大利撒丁岛实施50km示范验证	已构建基于卫星导航的低成本列控系统成套装备,并已产品化应用推广	已制定面向中西部铁路、高速铁路的系统方案,实施技术攻关与装备示范
目标导向	完善基于卫星导航的列控系统规范、列车定位相关标准,实现与既有等级列控系统的互联互通	将全国范围差分GPS系统(NDGPS)引入列控应用优化定位服务,促进系统平台统一,提升兼容能力	构建铁路专用北斗PNT体系,完善基于卫星导航的列控系统装备,制定配套标准并与北斗体系衔接

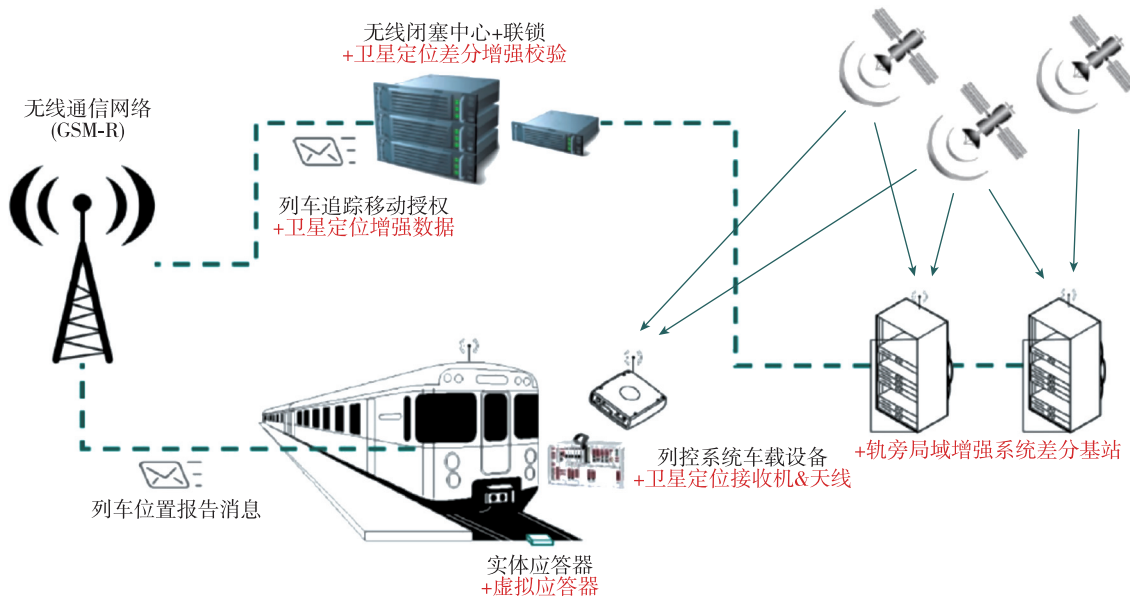


图6 专用轨旁GNSS增强网络列车自主定位架构^[63]

Fig. 6 Architecture of autonomous train positioning based on the dedicated track-side GNSS augmentation network

木线100 km实际线路进行了试验验证^[65]。

融合差分增强信息的列车定位还需要进一步辅以特定处理逻辑,从与列控系统安全需求紧密相关的“完好性”入手,对定位观测质量劣化及系统故障进行及时、准确的检测、诊断与排除。完好性导向的增强处理逻辑存在于卫星导航通道、多源融合通道两个过程,所采用的监测处理手段也各具有针对性。

在卫星定位处理层次,常基于用户端自主完好性监测框架,针对列车自主定位冗余结构实施定制化设计:Neri A. 等^[66]结合新型列控系统轨旁增强网络架构,设计了面向局域增强/全局增强双层结构的列车卫星定位增强算法,基于不同卫星间单差检测空间信号故障、不同类型差分基准站间残差检

测参考站故障,结合实际增强网络核心的轨旁区域服务器(track area local server, TALS)设备现场测试进行了检验^[67];Marais J. 等^[68]分析了将接收机自主完好性监测策略应用于列车定位系统的可行性,并指出列车定位系统可由接收机自主完好性监测、卫星增强系统及地基增强系统3种不同途径实现优化与增强;Kazim S. 等^[69]针对铁路沿线环境观测特征复杂性与列车定位完好性监测所用误差模型之间的偏差导致的性能风险,提出卫星定位误差模型的分级分类策略,通过差异化误差模型的运用提升水平保护级(horizontal protection level, HPL)等完好性监测量估计水平的优化,开展了基于天空图卫星可视特征建模的铁路沿线观测场景

分类^[70]；在基本的完好性监测机制下，考虑应对多GNSS系统联合及复杂故障模式等条件，已有研究形成面向GPS/Galileo多模定位的故障检测方法^[71]、引入基带信号辅助的故障检测方法^[72]，这些成果为列车自主定位中卫星定位自身的增强提供了定制化方案。

在多源融合处理层次，挖掘辅助感知信息增强完好性监测性能的潜力，已有多项研究引入图像视觉^[73]、轮轴测速定位^[74]、惯性导航^[75]、多普勒测速雷达^[76]、轨道空间信息^[77]等，形成列车自主定位系统级完好性监测优化方案。同步考虑卫星定位与辅助传感器的总体故障模式，故障检测与排除进一步扩大了覆盖范围。Filip A. 等^[78]采用“二乘二取二”结构设计了卫星导航/多普勒雷达/惯性组合列车定位单元，建立可靠性框图对冗余系统的安全性进行评估分析，提出定位单元自主完好性监测(locator autonomous integrity monitoring, LAIM)^[79]方法，将滤波残差拓展至列车安全缓冲来确保列车定位系统的完好性水平。考虑轮轴测速定位的空滑故障，已有研究利用GNSS对非卫导传感器故障实施主动检测，如：基于数据驱动的GNSS/轮轴测速定位故障检测诊断^[80]、基于多通道定位传感器交互的故障检测机制^[81]。此外，将估计方差、特征斜率等多参量集成，能够获得更完备的完好性保障能力^[82]，并可进一步采用均值膨胀、非高斯膨胀策略对非高斯统计特性进行主动适应^[83]。近年来，随着铁路运营环境日益复杂，已有研究开始关注铁路卫星定位干扰防护，在铁路专用抗干扰方案与韧性列车定位模式方面形成了初步结果^[84]，为后续面向多层域安全感知实现针对性的防护优化提供了思路。

3.3 定位专用轨道地图数据库

列车运行于固定轨道上，将轨道基础空间信息用于列车位置的决策、列车定位坐标体系的转换、定位性能的优化，是一种将“空间约束”在定位估计中发挥优势作用的必要途径。列车定位专用轨道地图数据库(trackmap database)一般由索引信息、轨道地理信息数据和固定应用数据构成，其中：轨道地理信息数据描述轨道关键点(point-of-interest, POI)的三维空间坐标及一维轨道里程，在实际运行中，由车载定位所得三维位置解与多个相关POI点构成的轨道片之间的投影匹配计算，得到列车沿轨道一维里程量，进而可换算为距参考点的相对走行距离，从而为ATP控车处理逻辑所识别及运用；固

定应用数据描述了区间、站内的数据边界、道岔、应答器等对象的相关信息，用于上述相对走行距离量换算过程中轨道身份及POI、参考点的确认。自21世纪初GPS早期被引入列车定位过程中，测量、制作、检验列车卫星定位专用空间数据信息即已成为一种必要手段。国内外机构、厂商均设计构建了列车定位专用轨道地图数据库及相应规范约定，在大规模测量数据约简处理^[85-86]、高效数据库架构^[87]、数据库性能评估检验^[88]、地图数据库自动生成工具链^[89]等方面形成了体系化成果。Fikejz J. 等^[90]设计了铁路线网的微观/中观/宏观多层体系概念，提出了分层地图模型的构建方法。Baldoni S. 等^[91]设计了列车自主定位专用的数字轨道地图，提出了地图先验信息辅助实现列车定位感知增强的可行方法。为对轨道空间数据格式规范化、标准化，德国、瑞士联合开发了基于可扩展标记语言(extensible markup language, XML)的轨道交通专用轨道标记语言RailML，实现通用化数据交换^[92]。近年来，OpenRailwayMap^[93]等开源地图数据协作计划的出现，为轨道地图数据库相关资源及技术的规范化、多元化发展创造了条件。

在将轨道“物理约束”转化至定位优化层面，根据图7所示架构案例^[94]，涉及两个层次的处理：轨道占用检测通道、沿轨道位置决策通道，逐步实现轨道信息辅助下的定位估计。

轨道占用检测通道解决列车所在轨道的身份识别问题，在列车所在邻域内存在多条并行股道、道岔等情况下实现解模糊，确定以何股道计算一维位置，相应的特征提取、状态匹配、识别决策等方面已有多项研究成果。Winter H. 等^[95]基于轨道几何约束的递归多级滤波方法，利用交互多模型(interacting multiple model, IMM)和扩展卡尔曼滤波融入轨道几何约束，确保轨道占用识别性能；Neri A. 等^[96]设计了卫星定位解算的双差载波相位观测量组合策略，融合轨道约束先验知识加速占用轨道识别；王迪等^[97]建立列车GNSS双差定姿数学模型，提出基于粒子滤波的风险敏感滤波算法获得高精度列车航向信息，采用支持向量机进行航向角分类及轨道信息匹配。此外，隐马尔科夫模型(hidden Markov model, HMM)^[98]、多传感器融合预测^[99]、LTS-Hausdorff(location technology solution-Hausdorff)距离^[100]、3D轨道模型增强射线追踪(ray tracing)^[101]等思想的应用为轨道占用识别及定位优化提供了可行方案。在综合辅

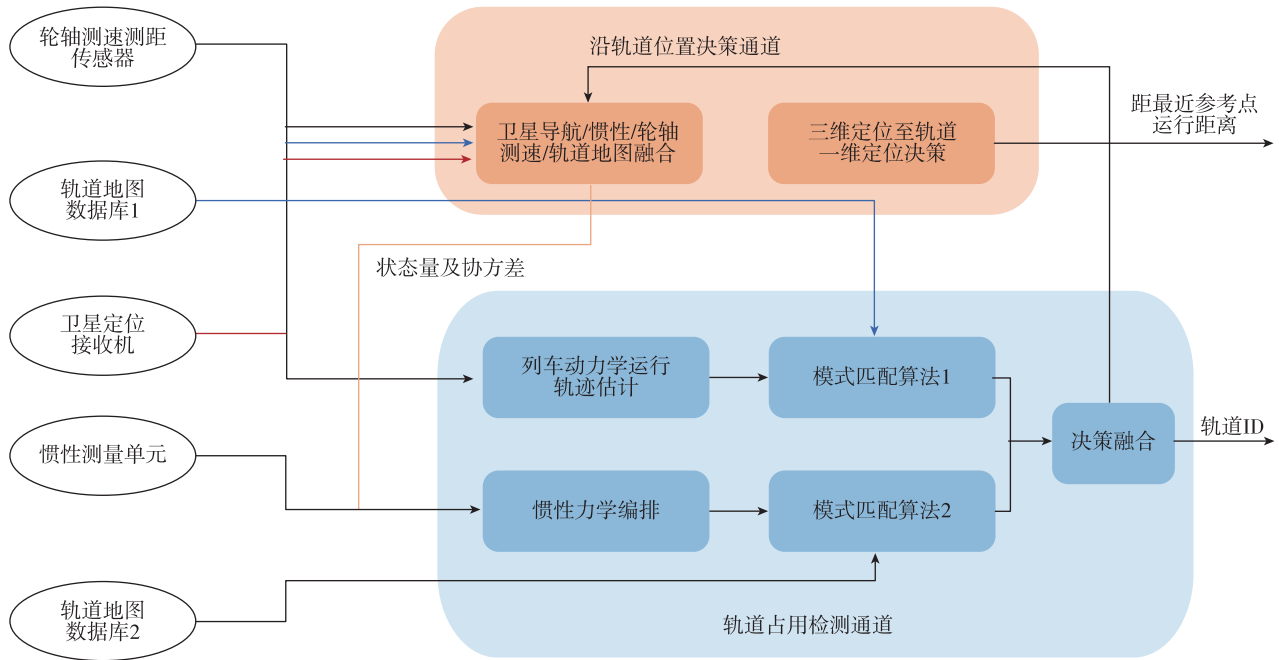
图7 基于轨道地图数据库空间信息辅助的列车自主定位解算架构^[94]

Fig. 7 Navigation calculation architecture of autonomous train positioning assisted by the spatial information from trackmap database

助传感器资源的占用识别策略方面: Crespillo O. 等^[102]提出地图辅助GNSS/惯性紧组合的轨道占用识别方法,采用动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network, DBN)表示系统状态在因果和时间上的关系,实现高轨道占用识别率; Heirich O. 等^[103]提出基于 Rao-Blackwellized 粒子滤波的 GNSS/惯性融合算法,实现在平行股道场景、道岔区域场景下轨道占用识别的高正确率; Zwemer M. 等^[104]提出基于视觉传感器的轨道占用识别方法,使用基于图理论的轨道重构算法和轨道先验几何知识完成轨道占用判别; Siebler B. 等^[105]使用安装在列车上的磁力计测量值与地图磁场值进行比较,采用假设检验识别列车占用轨道; Hensel S. 等^[106]采用涡流传感器结合 HMM 占用识别方案,为辅助卫星定位提供了新的适于轨道交通场景的传感器选项与发展方向。

沿轨道位置决策通道在识别轨道占用后决策一维列车位置,将离线的轨道地图数据库构建结果运用到列车实时在线定位估计中。其中,将轨道地图数据库用于离线构建受地图误差影响的卫星定位观测模型^[107]、复杂线路环境多径误差模型^[108]、轨道特征多轨迹增量优化模型^[109]等,将有助于为实时定位解算性能优化提供进一步支持。在将轨道地图数据库用于实时定位计算与决策中,一方面,所提供的“约束”特征信息能够用于辅助 GNSS 实施更优的实时定位

解算,代表性成果如:基于轨道信息约束的实时定位解算^[110]、地图辅助卫星定位方差矩阵估计^[111]、紧耦合列车相对定位解算^[88]、卫星定位/轨道地图协同定位解算^[112]、融入地图约束信息的粒子滤波估计^[102]、基于轨道地图构建状态依赖观测噪声的滤波估计^[113]等;另一方面,将轨道地图数据库提供的先验信息融入常规的 GNSS/辅助定位传感器融合框架,能够进一步实现连续、精确、可信的实时定位决策,其中,地图匹配(map matching, MM)^[114]作为基本的轨道地图数据库松耦合模式,已形成轨道线路拓扑分析、相似度、概率描述等多种计算方案^[115-116];将轨道空间信息统一纳入传感器融合过程,能够形成紧耦合层次的辅助定位方案。惯性导航作为多领域普遍应用的自主式定位方式,将其用于实时列车定位估计,构成“GNSS/INS/轨道地图”融合架构,已受到广泛关注,代表性成果包括: Heirich O. 等^[117]构建了基于贝叶斯估计的定位框架,将 GNSS、惯性导航、轨道地图纳入统一滤波框架,实现可靠定位估计; Wenz A. 等^[118]构建了轨道地图辅助 GNSS 多普勒、惯性测量、轮轴速度多观测融合架构,采用滚动时域估计(moving horizon estimator, MHE)实现精确位置、速度决策; Cao Z. 等^[119]以轨道空间数据为参照,设计了 GNSS/惯性导航组合架构实现对卫星观测质量反馈评估,用于干扰抑制防护。近年来,在惯性导航之外,将 GNSS、轨道地图数据库与其他定位传感器组合实现

实时定位决策,也已开始受到关注,如:Cao Z. 等^[120]挖掘列车既有轮轴测速定位的便利信息条件,提出基于“GNSS/INS/轮轴测速/轨道地图”的组合定位架构,引入干扰检测逻辑强化对电磁干扰环境的适应能力;Neri A. 等^[121]深化视觉、激光雷达等感知类传感器强化传统卫星定位/惯性导航组合架构,从线路空间信息延深至轨旁参考设施,为将卫星定位与环境探测功能交织与优化提供了新的思路方向;Wang Y. 等^[122-123]提出引入激光雷达实现列车同时定位与建图思想,并开发了 RailLoMer-V 列车精确定位框架,通过 GNSS、INS、视觉、激光雷达、轨道地图多源信息的深度融合,实现自主定位对列车在铁路线路上高重复度往复运行特性的有效适应。

3.4 自主定位性能测试评估

列车定位性能对列车控制决策有效性和安全性形成关键影响,为此,面向列车控制应用的自主定位性能评估方法及与之配套的测试评估技术与平台一直是本领域热点研究方向。与既有列控系统相比,基于卫星定位的新型列控系统具有更优的建设/维护成本效益,车载设备的自主性能能够更为灵活配置移动闭塞控制等新型模式,优化系统运行效率。新型列控具备既有列控系统的各项功能,主要差异在于引入卫星定位条件下,实现“列车定位功能”、“列车完整性检查功能”所需的技术途径和设备条件有所差异,此外,可延深实现移动闭塞控制功能及与既有列控模式间的等级切换功能。同为行使列车运行安全防护的安全苛求装备,对于既有列控系统与新型列控系统,测试均为确保系统安全性和可靠性水平的必须手段。考虑在铁路现场开展实际测试的可行性问题、较高成本以及特定危险场景覆盖难题,实施仿真测试已经成为一种必然途径。典型的面向铁路应用的专用定位测试平台包括意大利的 RFI 测试台、西班牙的 CEDEX ETCS/ERTMS 实验室等。西班牙的 INECO 公司开发了专用仿真工具,分析 GPS 和 Galileo 星座在铁路沿线和可配置时间框架内的卫星可视性,建立轨道环境三维模型,为铁路规划、运营阶段 GNSS 质量预评估提供完备且低成本化的解决方案。欧盟 2019 年发布了 Shift2Rail 新时期发展规划(Shift2Rail multi annual action plan),明确了在新一代智能化铁路中开展零现场测试(zero-on-site test)的发展路线,在专用测试评估方法方面已取得一定进展;Goya J. 等^[124]提出先进列车定位模拟器(advanced train location simulator, ATLAS),适用于不同的定位技术、数据融合逻

辑以及不同铁路线路环境,为各类列车定位系统测试评估提供了专用工具;Otegui J. 等^[125]在铁路现场开展列车定位测试,评估 GNSS 和 10 自由度的 IMU 在铁路隧道区域、开阔区域等环境的局限性,为仿真测试环境建模提供数据基础,并进一步提出用于测试列车定位算法的仿真框架,根据列车模型(列车牵引制动控制模型和列车动力学模型)、传感器误差模型、轨道电子地图等生成合成信号,评估不同传感器、列车配置、轨道、定位算法等在开发过程的不同阶段时的灵活性^[126];Quinones V. 等^[15]结合 ETCS 新型架构,建立了面向卫星定位与虚拟应答器功能的专用仿真工具,用于虚拟应答器功能级仿真测试评估;Kazim S. 等^[67]针对列车定位在不同场景下性能特征的动态差异性,提出典型运行场景下定位精度特征的精细化建模方法,用于构建面向列控系统专用定位仿真测试工具链的模型设计与优化。近期,欧盟设置 Gate4Rail 计划支持建立列车定位基础设施的地理分布式测试平台架构^[127],如图 8 所示,整合列车控制、卫星导航、测试评估专业机构(意大利 RadioLabs、BVI、RFI,法国 IF-STTAR、GUIDE,西班牙 CEDEX、INECO,比利时 UNIFE、M3S)各类资源,实现更为广泛兼容且高覆盖度的列车自主定位零现场仿真测试,重现各类铁路环境下 GNSS 的传播特性,评估受全局/局部影响显著的“故障—安全”列车定位性能,并对嵌入基于卫星定位的新型列控系统实施集成测试验证^[128]。

运用专用平台环境开展测试,还需进一步实施卫星导航用于列车控制的性能分析与安全评估,目前已在列车自主定位级、列控系统特征级两个层次形成多项进展。

在列车自主定位级,Otegui J. 等^[129]针对不同的列车自主定位方案,从测试环境、传感器类型、数据融合算法和现有研究成果 4 个方面建立了评估标准,判定不同定位方案的性能;Spinsante S. 等^[42]从不确定性出发,提出了特定列车组合定位方案的位置不确定性评估策略,通过组合不同来源的信息减小定位性能的不确定性;Stallo C. 等^[130]评估了列车运行环境中局部效应(多路径、部分遮挡、全遮挡等)对基于 GNSS 实现列车定位的性能影响,使用真实测试数据和特殊场景仿真数据进行了可用性、精度和完好性等指标的评估验证;Legrand C. 等^[131]将面向卫星定位的评估拓展到多源组合系统,提出列车多源融合定位性能评估方案;崔科

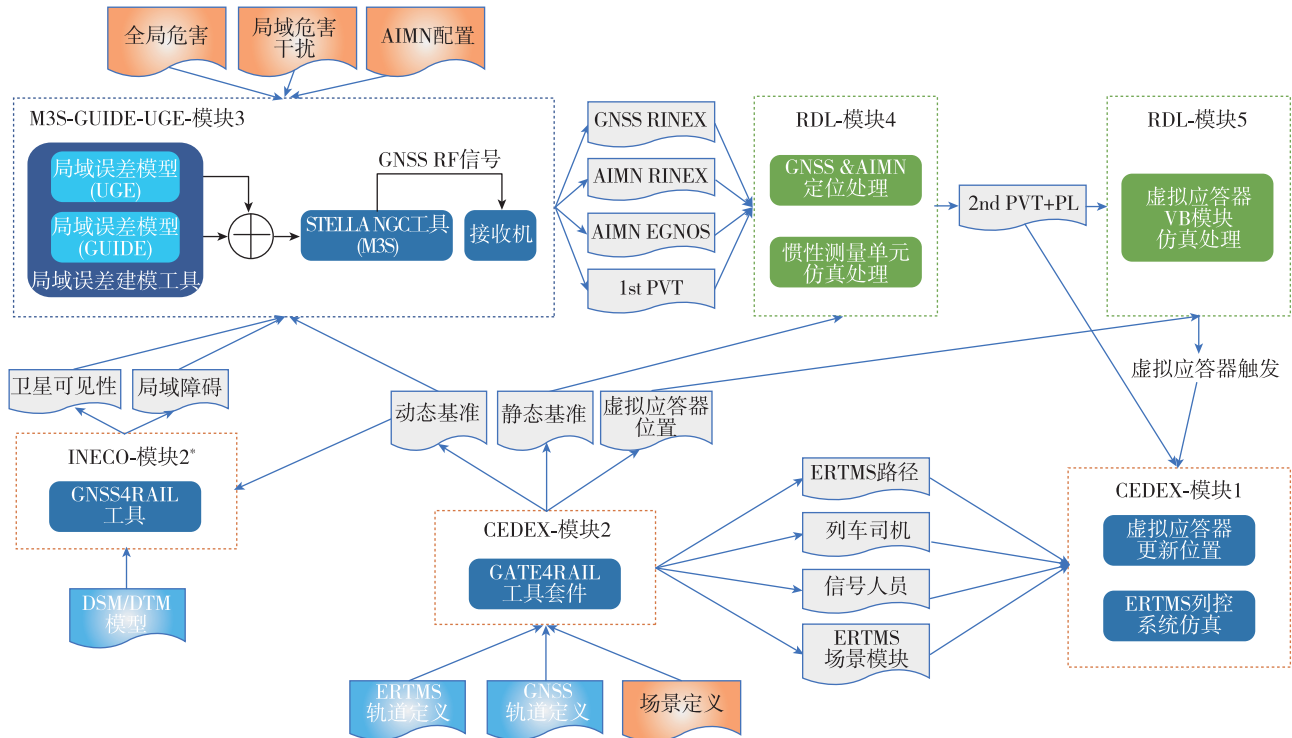


图8 Gate4Rail计划地理分布式列控系统自主定位虚拟测试架构^[127]

Fig. 8 Geo-distributed virtual test architecture for autonomous positioning of train control system in the Gate4Rail project

等^[132]考虑轮轴测速、多普勒雷达组合,提出利用滤波残差检测列车空转/打滑,并运用故障树进行危险性失效概率建模和分析,计算危险失效概率并评估完全完整性。

在列控系统特征级,进一步关注定位决策应用于列车控制所致功能安全水平对应的评估方法:Neri A. 等^[133]分析了卫星导航用于列车定位的安全评估方法与平台,对标准规范体系化发展进程进行了设计;Geffert A. 等^[134]建立了解释GNSS域(测量质量)和交通域(可靠性)关系模型,采用基于完好性指标的GNSS测量质量模型揭示了六类列车定位性能空间,将GNSS定位状态与虚拟应答器可信状态建立联系,实现测试评估向列控接口环节的延伸;Beugin J. 等^[135]提出了基于多种传感器融合定位系统进行列车间隔控制的安全评估方法,分析了基于GNSS的ETCS-3级移动闭塞风险演变机理,使用估计置信度相关参数进行列车间隔控制安全评估;Himrane O. 等^[136-137]针对ETCS新型系统GNSS的运用,围绕安全苛求特征开展系统形式化建模,并运用UPPAAL模型检测工具与统计模型检测(statistical model checking, SMC)引擎构建了工具链,开展了安全相关性能指标的定性分析与量化分析;Kazim S. 等^[138]提出基于卫星定位的组合定位

系统的关键性能指标(key performance indicators, KPI),为列车自主定位面临不同等级观测条件以及采纳主动防护措施情况下的性能水平评估提供了途径;Nguyen K. 等^[139]基于模糊逻辑提出ETCS可用性需求下列车定位单元的不可用度限值,构建了列车自主定位单元与列控系统适配度评估方案;帅玮等^[140]设计了平行递进模型下列车定位性能指标体系间的映射关系模型,提出基于GNSS的定位单元RAMS指标定量计算策略;莫志松等^[141]提出列车定位安全性分析判断规则,采用极端参数组合方案构建了60类典型场景,评估不同场景下的北斗定位性能,为明确北斗卫星定位在新型列控系统中的应用方案及应答器简化配置原则提供了依据。

4 未来发展展望

4.1 前沿技术运用演进

随着全球卫星导航系统的现代化进程以及各类应用需求的不断延伸,卫星定位技术向着高精度、高可靠方向不断发展,卫星导航高精度定位技术也历经了多代更新与发展,形成包括实时差分动态定位(real-time kinematic, RTK)、精密单点定位(precise point positioning, PPP)、网络RTK、PPP-RTK等在内的新兴技术。北斗三号系统卫星播发

的 PPP-B2b 信号使得实时精密单点定位 (real-time PPP, RTPPP) 等高精度定位前沿技术的运用成为现实,从而突破传统 PPP 技术在收敛时间等方面存在的限制。随着北斗三号 PPP-B2b 使能的前沿技术不断成熟,其在新型列车控制系统的运用将形成两个层面的影响。一方面,未来将通过前沿技术的运用,有效提升在特定观测环境下车载卫星定位的精度水平,进一步融入列车控制系统特定需求,在实时高精度基础上延深可信性监测优化机制,向精细化、矢量化、载波相位层级以及终端/服务端协同方向发展,支撑卫星定位这一信息通路为列车自主定位决策的整体过程提供有力保障;另一方面,结合北斗三号 PPP-B2b 服务的特点,此类前沿技术的运用将进一步简化对轨旁设施的需求,改变现行采用轨旁 GNSS 增强网络尚需依赖一定铁路沿线专用设施的局,使列车定位技术方案更深刻地体现“车载自主化”特征,列车控制系统架构在列车定位层面将进一步向“轨旁最少化”方向演进,相应的接口配置、通道协议、决策机制等都将进一步迭代形成新的体系方案,为实现更高等级系统模式提供支持。

4.2 关键场景融合优化

铁路广域成网特征及线/桥/隧专用基础设施条件使卫星导航观测服务性能特征水平既存在规律性、又面临复杂性,列车控制系统对自主定位性能的多方位需求,需要在坚持以卫星定位为基础的情况下,通过深化对多源 PNT 技术的综合运用,实现在卫星导航拒止条件下能够主动、灵活获取并融合多源信息,确保满足定位能力需要,从而在铁路沿线环境的非暴露空间、导航观测受限、信号质量劣化等关键场景向列车控制逻辑提供“故障—安全”导向的信息支持,包括:轨道区域多模态空间基础信息实时接入,满足特定运行模式及列控接口形态下的精度与完好性需求,极端场景安全、可靠、实时测速定位决策,复杂观测条件对定位性能影响的建模与预测,导航信号观测质量异变、误导时的及时预警。未来将进一步延深对多模定位观测信息的接入,突破多源感知融合面临的非建模误差、非线性观测特性逼近偏离、不确定分布特性时变偏差等问题可能导致的估计失准风险问题,实现适于复杂动态运行条件的列车定位深度可信融合估计。在融合估计算法基础上进一步改善融合结构策略,构建不同定位感知源对关键场景的适配规则库与

预测模型,通过引入多感知源接入融合决策处理的无缝切换触发机制,将有助于形成基于场景驱动的定位融合结构动态调整重构能力,达到列车自主定位对复杂时变运行条件的精准跟踪与主动适配目标,在未来实现与更高自动化等级、更优自主化水平新型列车控制系统的兼容。

4.3 复杂环境安全防护

将卫星导航应用于列车控制系统,安全始终是重点关注的前提性因素,国内外相关研究与应用中目前的主要关注点仍主要集中于卫星定位的技术适应度匹配(如解决信号遮蔽、多径及弱信号环境下的定位服务可用性问题)及其与列车控制安全苛求特征的关联衔接,对定位安全性的考虑尚处于功能安全范畴,未进一步深入触及卫星导航自身脆弱性导致的信息安全风险及有效防护层面。鉴于卫星定位需从开放空间获取卫星信号进而实施信号捕获及解算的本体机制,且铁路运输所面临社会环境、空间电磁环境日益复杂,来自铁路沿线及周边设施的无意电磁干扰,如电气化铁路高压接触网的电磁场干扰、民用设施对卫星导航信号的同频干扰等,以及不法分子的主动干扰压制、蓄意欺骗攻击等,均会对列车自主定位的安全性造成严重威胁,卫星导航干扰装置的小型化、成本低廉化、应用隐蔽化,进一步加剧了信息安全层面的风险。为此,在多层针对性构建干扰攻击的主动检测与弹性定位机制,注重实现干扰防护成本效益的均衡优化,已成为有效推进列控系统自主定位的安全加固、前瞻性布局新型列车控制系统安全保障体系的迫切需要。人工智能技术近年来得到快速发展,将数据驱动思想与物理机理相融合,有望在复杂环境下列车自主定位的功能安全/信息安全双重防护中发挥重要作用。

4.4 跨层协同全息感知

现有自主定位融合研究侧重于在测速定位状态域层次,集中于列车载体的运动特征及过程的自主感知,针对列车间追踪逻辑判别与控制决策等传统列车控制功能具有局域适用性。然而,未来新型的列车控制系统,为了进一步防护除追踪前车之外的人、车、物的安全风险,将更加强调列车与环境间耦合关系的掌握。现有列车自主定位在感知的“全息化水平”方面尚有待提升,这一方面体现在感知量覆盖范围的片面性和聚焦性,从更深的层次来看,还体现在列车、轨道、环境 3 个层次之间感知能

力的相对独立性,未能有效在不同层次之间建立起紧密深入的耦合关联关系。未来有望在列车自身运行状态之外,进一步关联演进“跨层全息感知”能力,通过更广域的传感、更智能的处理、更精准的决策,支撑列车控制系统能够对“车—路—环”多层次特征以更优的精度、广度、深度进行汇聚、识别与理解,实现多模态感知资源优势的深度转化,支撑列车控系统“重构”和“再造”对物理世界中态势与风险的全面认知,满足主动、全面掌握列车内外部运行态势的需求。

4.5 专用标准规范体系

当前,卫星导航铁路安全应用领域尚无相应标准规范,美国、欧盟及我国均在列控系统自主定位的性能指标参数映射关系、性能评估、仿真测试场景建模、测试案例生成等开展了相关研究,然而,尚未从列控系统层面构建与之配套的规范体系,对卫星导航系统的引入及合理运用形成统一约定。伴随新型列控系统进程的不断推进,未来有望结合系统研发与应用,构建适于我国北斗列控系统应用的专用标准规范。在此基础上,考虑到在铁路现场开展试验费用昂贵、安全风险高、消耗设备代价巨大、影响安全生产,且重复测试难以实现,将基于铁路专用仪器装置的零现场仿真测试与现场测试相结合,通过平行映射、虚实交融,构建基于完备测试场景的铁路专用定位测试环境已成为必然趋势。以标准规范体系为基础,注重对新型列控系统的全生命周期支撑作用,面向概念验证、系统设计、装备研制、测试评估、运用维护等各个生命周期环节提供全方位的测试服务,将进一步强化北斗在铁路安全领域的应用条件并推动铁路专用北斗时空综合服务体系的构建与发展,打造北斗导航系统在铁路行业应用自主资源、自有技术、自造装备三位一体效应。

5 结束语

在以全面感知、融合处理、主动学习、科学决策为特征的智能铁路发展模式下,以北斗为代表的卫星导航系统在铁路行业的应用发展,已成为新时代交通强国建设的一项重要内容。列车运行控制作为关乎行车安全与运营效率的关键铁路装备,引入卫星定位能够形成列车控制系统车载自主化的显著效益,已成为国内外一致的前沿路线和发展方向。近年来,基于卫星导航系统实施列车自主定位

已逐步由策略思路走向应用实践,各类多源辅助卫星定位的架构不断涌现,更多卫星定位驱动的列车自主安全定位体系设计及应用探索已处于快速发展和不断完善中,以卫星定位为基础、综合运用多种软硬件资源、先进的信息处理方法,将是突破轨旁少维护、架构可伸缩、风险可防护的列车安全控制难题的关键手段。可以预见的是,基于卫星导航的自主定位及泛化感知将在新型智能铁路系统领域实现更为广泛和重要的应用,在铁路专用北斗PNT体系发展及交通强国建设中发挥不可替代的关键作用。

参考文献

- [1] 王同军. 中国智能高速铁路体系架构研究及应用[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 1-9.
WANG Tongjun. Research and applications of China railway intelligent high-speed railway architecture[J]. China Railway Society, 2019, 41 (11): 1-9 (in Chinese).
- [2] 李强. 基于北斗卫星技术川藏铁路列控系统展望与思考[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(8): 105-116.
LI Qiang. Outlook and thinking on train control system for Sichuan-Tibet railway based on BeiDou satellite technology[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 105-116 (in Chinese).
- [3] 郭玉华. 借鉴 ETCS 完善 CTCS 技术规范体系的研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(10): 136-140.
GUO Yuhua. Perfecting CTCS technical specifications with reference to ETCS[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(10): 136-140 (in Chinese).
- [4] COLLART-DUTILLEUL S. (eds) Operating rules and interoperability in trans-national high-speed rail [M]. Springer, Cham. 2022.
- [5] 蔡伯根, 朱强, 上官伟, 等. 动态间隔可调整的列控系统自主感知关键技术及应用[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 31-41.
CAI Baigen, ZHU Qiang, SHANGGUAN Wei, et al. Key technology and application of autonomous sensing for train control system with adjustable dynamic interval[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 31-41 (in Chinese).
- [6] 莫志松. 智能铁路列控系统技术发展方向展望[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(8): 1-7.
MO Zhisong. Prospect on technical development of intelligent railway train control system[J]. Railway

- Signalling & Communication, 2022, 58(8): 1-7 (in Chinese).
- [7] NEDELIÁKOVÁ E, HRANICKY M, CECHOVIC L. Possibilities of implementing satellite navigation elements in the field of railway transport[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 40: 1504-1509.
- [8] FILIP A, SABINA S, RISPOLI F. A framework for certification of train location determination system based on GNSS for ERTMS/ETCS[J]. International Journal of Transport Development and Integration, 2018, 2(3): 284-297.
- [9] GURNIK P. Next generation train control (NGTC): more effective railways through the convergence of main-line and urban train control systems[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1855-1864.
- [10] 中国铁道学会智能铁路委员会, 中国铁道科学研究院集团有限公司科学技术信息研究所. 欧洲智能铁路发展相关规划[J]. 铁路计算机应用, 2023, 32(3): 79-82.
- Intelligent Railway Committee of China Railway Association, Scientific & Technological Information Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. European intelligent railway development related planning [J]. Railway Computer Application, 2023, 32(3): 79-82 (in Chinese).
- [11] MIGUEL G, GOYA J, FERNÁNDEZ N, et al. Map-aided software enhancement for autonomous GNSS complementary positioning system for railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11611-11620.
- [12] XIE G, HEI X, MOCHIZUKI H, et al. Safety and reliability estimation of automatic train protection and block system[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2014, 30(4): 463-472.
- [13] 范明. 中国列车运行控制系统(CTCS)技术发展漫谈[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(z1): 41-48.
- FAN Ming. Technical development of Chinese train control system (CTCS) [J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(z1): 41-48 (in Chinese).
- [14] 王剑, 陆德彪, 唐一哲, 等. 基于虚拟应答器的GNSS列车安全定位及风险分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(6): 53-58.
- WANG Jian, LU Debiao, TANG Yizhe, et al. Virtual balise application for GNSS train safe location and risk analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(6): 53-58 (in Chinese).
- [15] QUIÑONES V, ÁGUILA A, CORDERO I. GNSS4rail simulation tool. supporting virtual balise (VB) location for GNSS based railway operations [C]// International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, 2021: 1-5.
- [16] CRESPILO O, GERBETH D, POGNANTE F, et al. ERSAT GGC. ERTMS on satellite Galileo game changer [D]. IFSTTAR-Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 2019.
- [17] JIANG W, LIU M, CAI B, et al. An accurate train positioning method using tightly-coupled GPS+BDS PPP/IMU strategy[J]. GPS Solutions, 2022, 26(3): 67.
- [18] KO K, AHN W, SHIN W. High-speed train positioning using deep Kalman filter with 5G NR signals[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15993-16004.
- [19] FALAHATI A, SHAFIEE E. Improve safety and security of intelligent railway transportation system based on balise using machine learning algorithm and fuzzy system[J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2022: 1-15.
- [20] WULLEMS C, SPERANDIO F, BASSO M, et al. A preliminary apportionment of safety targets for virtual balise detection using GNSS in future evolutions of ERTMS [C]// 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications, 2018: 1-8.
- [21] FILIP A. Travelling virtual balise for ETCS [C]// 15th International Conference on Railway Engineering Design and Optimisation, 2016: 272-282.
- [22] AZAOLA M, FIDALGO J, BARRIOS J, et al. Introduction of GNSS in railway safety of life applications: virtual balise detection in ERTMS [C] // 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2018: 1483-1496.
- [23] NO H, VEZINET J, MILNER C. Diagnostics of GNSS-based virtual balise in railway using embedded odometry and track geometry [C]// 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 2019: 296-305.
- [24] United States Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard [S]. Washington, 2008.
- [25] European Commission. Galileo mission high level definition document (HLD) 3.0. [R/OL]. 2002. http://www.gps-netz.at/data/files/GALILEO-HLD_030401.PDF.
- [26] 中国卫星导航系统管理办公室(CSNO).北斗卫星导航系统公开服务性能规范(V3.0): GB/T 39473-2020

- [S]. 2021.
China Satellite Navigation Office (CSNO). Beidou navigation satellite system open service performance standard (version 3.0): GB/T 39473-2020[S]. 2021 (in Chinese).
- [27] WISS J, BARBU G, FROSIG M, et al. Requirements of rail applications[C] // GNSS Rail User Forum, 2000.
- [28] Global Navigation Satellite Systems Agency. Report on rail user needs and requirements[R]. Outcome of EU GNSS Users Consultation Platform, 2019.
- [29] FILIP A, CAPUA R, NERI A, et al. Derivation of harmonised high-level safety requirements for self-driving cars using railway experience[J]. Scientific Reports. 2022, 12(1): 1-13.
- [30] FILIP A, OLÍK F, NERI A, et al. D2.1 User Requirements Specification [S/OL]. 2020. https://www.researchgate.net/publication/342673820_HEL-MET_USER_REQUIREMENTS_SPECIFICATION.
- [31] National Coordination Committee. 2021 Federal Radionavigation Plan[S/OL]. 2021. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/63024>
- [32] European Committee for Electrotechnical Standardization. CENELEC EN 50126: railway applications-the specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS):50126-1: 1999[S]. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardisation, 2007.
- [33] NGUYEN T, BEUGIN J, MARAIS J. RAMS analysis of GNSS based localisation system for the train control application[C]// 2014 International Conference on Computing, Management and Telecommunications, 2014: 101-106.
- [34] REINBOLD F, WEGENER M, SCHNIEDER E. QualiSaR-development of a qualification procedure for the usage of Galileo satellite receivers for safety relevant applications[J]. ENC GNSS, Gdansk, 2012.
- [35] FILIP A, BEUGIN J, MARAIS J, et al. A relation among GNSS quality measures and railway RAMS attributes[C]// CERGal 2008, Braunschweig, Germany, 2008: 2-3.
- [36] LU D, SCHNIEDER E. Performance evaluation of GNSS for train localization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 16(2): 1054-1059.
- [37] LU D, TORO F G, SCHNIEDER E. RAMS evaluation of GNSS for railway localization[C]//2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation, 2013: 209-214.
- [38] LU D, WU D, SCHNIEDER E. Hazard analysis for GNSS-based train localisation unit with model based approach according to EGNOS SoL and railway RAMS [C]// 14th IAIN Congress. 2012.
- [39] BEUGIN J, MARAIS J. Simulation-based evaluation of dependability and safety properties of satellite technologies for railway localization[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 22: 42-57.
- [40] BEUGIN J, FILIP A, MARAIS J, et al. Galileo for railway operations: question about the positioning performances analogy with the RAMS requirements allocated to safety applications[J]. European Transport Research Review, 2010, 2(2): 93-102.
- [41] FILIP A, BEUGIN J, MARAIS J, et al. Interpretation of the Galileo safety-of-life service by means of railway RAMS terminology[J]. Transactions on Transport Sciences, 2008, 1(2): 61-68.
- [42] SPINSANTE S, STALLO C. Hybridized-GNSS approaches to train positioning: challenges and open issues on uncertainty[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1885.
- [43] 严恭敏, 戴晨杰, 刘璠. 再论联邦滤波在组合导航中的应用可行性[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 1-6.
- YAN Gongmin, DAI Chenjie, LIU Fan. Further discussion on the application feasibility of federated Kalman filter in integrated navigation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(4): 1-6(in Chinese).
- [44] MALLESWARAN M, VAIDEHI V, IRWIN S, et al. IMM-UKF-TFS model-based approach for intelligent navigation[J]. The Journal of Navigation, 2013, 66(6): 859-877.
- [45] MINETTO A, FALCO G, DOVIS F. On the trade-off between computational complexity and collaborative GNSS hybridization[C]// IEEE Vehicular Technology Conference, 2019: 1-5.
- [46] HEIRICH O, ROBERTSON P, STRANG T. Rail-SLAM-localization of rail vehicles and mapping of geometric railway tracks[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013: 5212-5219.
- [47] WEN W, PFEIFER T, BAI X, et al. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: a comparison with the extended Kalman filter[J]. Navigation: Journal of the Institute of Navigation, 2021, 68(2): 315-331.
- [48] LIU Y, LU D, YUE L, et al. Case study on factor graph optimization in dependable GNSS train localization[C]// IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2022: 1935-1942.

- [49] WANG J, JIA H, BAI X, et al. Research on the location of railway train in tunnel based on factor graph optimization[J]. *Applied Computer Letters*, 2023, 7(1): 1-4.
- [50] SUN R, WANG G, CHENG Q, et al. Improving GPS code phase positioning accuracy in urban environments using machine learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(8): 7065-7078.
- [51] LI Z, XU K, WANG H, et al. Machine-learning-based positioning: a survey and future directions[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(3): 96-101.
- [52] ZHI Z, LIU D, LIU L. A performance compensation method for GPS/INS integrated navigation system based on CNN-LSTM during GPS outages[J]. *Measurement*, 2022, 188: 1-14.
- [53] HEIRICH O, ROBERTSON P, GARCIA A, et al. Probabilistic localization method for trains[C]// 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2012: 482-487.
- [54] DOU J, XU B, DOU L. Impact assessment of the asynchronous clocks between reference and user receivers in differential pseudolite navigation system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(1): 403-411.
- [55] HOELPER C, PÖLÖSKEY M. Galileo above-a terrestrial Galileo test environment for vehicular applications: automotive & rail[C]// 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 2010: 1-5.
- [56] WEN W, HSU L T. Factor graph optimization for tightly-coupled GNSS pseudorange/Doppler/carrier phase/INS integration: performance in urban canyons of Hong Kong [C] // 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2022: 2178-2189.
- [57] FU J, LI G, TANG T, et al. Research on performance evaluation of Beidou be enhanced by pseudolites [C]// China Satellite Navigation Conference, 2017: 629-643.
- [58] BAZANT L, TAUFER J. The pseudolite system concept for railway[C]// World Congress of Rail Research, 2008: 1-10.
- [59] ZHAO X, LIU J, CAI B, et al. Research on optimized pseudolite constellation design under constrained GNSS environment in railway stations[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2019: 3475-3481.
- [60] TAUFER J, BAZANT L. The risk analysis of pseudolite and satellite navigation system[J]. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2007, 94.
- [61] HUTCHINSON M, MARAIS J, MASSON E, et al. Precise and reliable localization as a core of railway automation (Rail 4.0)[J]. 360. *Revista de Alta Velocidad*, 2018, 1(5): 149-157.
- [62] RISPOLI F, CASTORINA M, NERI A, et al. Recent progress in application of GNSS and advanced communications for railway signaling[C]// 2013 23rd International Conference Radioelektronika, 2013: 13-22.
- [63] RISPOLI F, ENGE P, NERI A, et al. GNSS for rail automation & driverless cars: a give and take paradigm [C]// 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2018: 1468-1482.
- [64] SALVATORI P, STALLO C, COLUCCIA A, et al. Differential GNSS and double difference approaches comparison for high integrity railway location determination system[C]// 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, 2018: 1-5.
- [65] CAI B, LIU J, DONG X, et al. Study on key technologies of GNSS-based train state perception for railway signaling[J]. *High-speed Railway*, 2023, 1: 47-55
- [66] STALLO C, NERI A, SALVATORI P, et al. GNSS integrity monitoring for rail applications: two-tiers method[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 55(4): 1850-1863.
- [67] KAZIM S, TMAZIRTE N, MARAIS J. Realistic position error models for GNSS simulation in railway environments[C]// 2020 European Navigation Conference, 2020: 1-9.
- [68] MARAIS J, BEUGIN J, BERBINEAU M. A survey of GNSS-based research and developments for the European railway signaling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(10): 2602-2618.
- [69] RISPOLI F, SICILIANO G, BRENNAN C. GNSS for ERTMS train localization[J]. *Inside GNSS*, 2017, 12(2): 48-54.
- [70] MARAIS J, KAZIM S A, COCHERIL Y, et al. Multipath and NLOS detection based on the combination of C/N_0 values and a fish-eye camera[C]// 2020 European Navigation Conference, 2020: 1-13.
- [71] SALVATORI P, NERI A, STALLO C, et al. A multiple satellite fault detection approach for railway environment[C]// 15th International Conference on ITS Telecommunications, 2017: 1-5.
- [72] WANG E, YANG D, WANG C, et al. Optimized fault detection algorithm aided by BDS baseband

- signal for train positioning[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(1): 34-40.
- [73] BALDONI S, BATTISTI F, BRIZZI M, et al. Virtual track: a vision-based integrity enhancement[C]// 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2020: 1625-1634.
- [74] LIU J, CAI B, WANG J, et al. Track map-aided capture of virtual balises: a compatible approach to satellite-based railway train control[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2020, 14(3): 233-249.
- [75] GARCIA C O. Map based multisensor railway localization enhanced by raw GNSS data[D]. Universidad de Málaga, 2013.
- [76] NERI A, SALVATORI P, STALLO C, et al. A multi-sensor autonomous integrity monitoring approach for railway and driver-less cars[C]// 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2018: 1605-1621.
- [77] LIU J, CAI B, LU D, et al. An enhanced RAIM method for satellite-based positioning using track constraint[J]. IEEE Access, 2019, 7: 54390-54409.
- [78] FILIP A, MOCEK H, BAZANT L. GPS/GNSS based train positioning for safety critical applications [J]. Signal Und Draht, 2001, 93(5): 51-55.
- [79] FILIP A, TAUFER J, MOCEK H, et al. The high integrity GNSS/INS based train position locator[J]. WIT Transactions on the Built Environment, 2004, 74.
- [80] NAMOANO B, RUIZ-CARCEL C, EMMANOUIL-DIS C, et al. Data-driven wheel slip diagnostics for improved railway operations[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(19): 103-108.
- [81] KIM K, SEOL S, KONG S H. High-speed train navigation system based on multi-sensor data fusion and map matching algorithm[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13: 503-512.
- [82] LU D, CAI B, TANG D, et al. Environmental feature enabled digital track map for GNSS-based train localization safety boundary estimation [C]// 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2021: 2318-2327.
- [83] NERI A, CAPUA R, FILIP A, et al. Integrity bounds for rail and road applications based on local hazard maps [C]// 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2021: 4157-4169.
- [84] STALLO C, SALVATORI P, COLUCCIA A, et al. GNSS anti-jam RF-to-RF on board unit for ERTMS train control[C]// International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2020: 1045-1058.
- [85] 刘江, 蔡伯根, 唐涛, 等. 基于 GPS 的列控轨道地图数据生成方法研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 111-117.
- LIU Jiang, CAI Baigen, TANG Tao, et al. Research on GPS based track map data generation method for train control[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(1): 111-117(in Chinese).
- [86] 陶维杰, 蔡伯根, 王剑, 等. 数字轨道地图平面线形特征提取方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 81-87.
- TAO Weijie, CAI Baigen, WANG Jian, et al. Research on geometry extraction of railway horizontal curves for digital track map[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(9): 81-87(in Chinese).
- [87] 陶维杰, 蔡伯根, 刘江, 等. 基于 UKF 的数字轨道地图的三维线路生成方法[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 227-236.
- TAO Weijie, CAI Baigen, LIU Jiang, et al. UKF-based three-dimensional track generation method for digital track map[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 227-236(in Chinese).
- [88] SIEBLER B, DE PONTE MÜLLER F, HEIRICH O, et al. Algorithms for relative train localization with GNSS and track map: evaluation and comparison [C]//International Conference on Localization and GNSS, 2017: 1-7.
- [89] TAO W J, CAI B G, WANG J, et al. Digital track map generation for safety-critical railway applications [C]// 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2017: 1978-1987.
- [90] FIKEJZJ, KAVIČKA A. RegioRail-GNSS train-positioning system for automatic indications of crisis traffic situations on regional rail lines[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 5797.
- [91] BALDONI S, BATTISTI F, BRIZZI M, et al. On the design of high accuracy rail digital maps based on sensor fusion[C]// International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2022: 1420-1431.
- [92] NASH A, HUERLIMANN D, SCHÜTTE J, et al. RailML-a standard data interface for railroad applications [J]. WIT Transactions on the Built Environment, 2004, 74.

- [93] RICHTER A, LOWNER M, EBENDT R, SCHOLZ M. Towards an integrated urban development considering novel intelligent transportation systems: urban development considering novel transport[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2020, 155: 1-14.
- [94] BROCARD P, PONS R, LIGORIO G, et al. Infrastructure free solution for train positioning using track database [C]// 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2020: 341-361.
- [95] WINTER H, WILLERT V, ADAMY J. Increasing accuracy in train localization exploiting track-geometry constraints[C]// 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2018: 1572-1579.
- [96] NERI A, CAPUA R, SALVATORI P. Track constrained RTK-like positioning for railway applications [J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2018, 65(3): 335-352.
- [97] 王迪, 陈光武, 刘射德, 等. 基于 GNSS 双差定姿的区间列车轨道占用判别方法研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(11): 77-83.
WANG Di, CHEN Guangwu, LIU Shede, et al. Study on GNSS double difference attitude determination-based train track occupancy discrimination method[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(11): 77-83(in Chinese).
- [98] DEYLID I, MOLODYAKOV S, TYUTIN B. Development of an algorithm for determining the railway tracks on video image [C]//International Scientific Conference on Telecommunications, Computing and Control, 2021: 27-35.
- [99] STEIN D, LAUER M, SPINDLER M. An analysis of different sensors for turnout detection for trainborne localization systems[J]. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2014, 135: 827-838.
- [100] YAN X, WANG J, CAI B, et al. A novel automatic track identification algorithm based on LTS-Hausdorff distance[C]//14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2011: 1984-1988.
- [101] ZHANG Y, LU D, CAIB, et al. 3D digital track map-based GNSS NLOS signal analytical identification method [C]//2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2021: 313-318.
- [102] CRESPILO O, HEIRICH O, LEHNER A. Bayesian GNSS/IMU tight integration for precise railway navigation on track map[C]// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2014: 999-1007.
- [103] HEIRICH O. Bayesian train localization with particle filter, loosely coupled GNSS, IMU, and a track map [J]. *Journal of Sensors*, 2016, V2016: 1-15
- [104] ZWEMER M, WOUW D, JASPERS E, et al. A vision-based approach for tramway rail extraction[J]. *SPIE Proceedings*, 2015, 9407: 227-239.
- [105] SIEBLER B, HEIRICH O, SAND S, et al. Joint train localization and track identification based on earth magnetic field distortions[C]// 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2020: 941-948.
- [106] HENSEL S, HASBERG C, STILLER C. Probabilistic rail vehicle localization with eddy current sensors in topological maps[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1525-1536.
- [107] GROSCHE A, CRESPILO O. Impact of unknown digital map errors on satellite-based navigation in railway[C]// European Navigation Conference, 2020: 1-12.
- [108] ROBL F, CRESPILO O, HEIRICH O, et al. A map based multipath error model for safety critical navigation in railway environments[C]// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2023: 446-457.
- [109] BRIZZI M, NERI A. Multi-ride fusion for rail digital map construction. [C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2023: 740-747.
- [110] ZHENG Y, CROSS P. Integrated GNSS with different accuracy of track database for safety-critical railway control system[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(2): 169-179.
- [111] JIN C, CAI B, WANG J, et al. DTM-aided adaptive EPF navigation application in railways[J]. *Sensors*, 2018, 18: 1-16.
- [112] LIU J, CAI B, WANG J. A GNSS/trackmap cooperative train positioning method for satellite-based train control[C]// IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2014: 2718-2724.
- [113] LOFFLER W, BENGTTSSON M. Using probabilistic geometrical map information for train localization [C]// 25th International Conference on Information Fusion, 2022: 1-8.
- [114] CHEN S, JIANG W, CAI B, et al. Seamless train localization based on BDS/INS/odometer/MM multi-sensor navigation system [J]. *International Global Navigation Satellite Systems*, 6-8.
- [115] LAUER M, STEIN D. A train localization algorithm for train protection systems of the future[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*,

- 2015, 16(2): 970-979.
- [116] JIANG Z. Digital route model aided integrated satellite navigation and low-cost inertial sensors for high-performance positioning on the railways[D]. PhD. Thesis, University College London, London, 2010.
- [117] HEIRICH O, ROBERTSON P, GARCIA A C, et al. Bayesian train localization method extended by 3D geometric railway track observations from inertial sensors[C]// 15th International Conference on Information Fusion, 2012; 416-423.
- [118] WENZ A, EHRLER R, OHRENDORF-WEISS S. Map supported train localization[C]// 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2022; 1978-1988.
- [119] CAO Z, LIU J, JIANG W, et al. Resilient train localization based on GNSS/INS/trackmap integration using a MAP-AICKF method[C]// 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2022; 353-366.
- [120] CAO Z, LIU J, JIANG W, et al. INS/odometer/trackmap-aided railway train localization under GNSS jamming conditions[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2022; 427-434.
- [121] NERI A, BATTISTI F, BALDONI S, et al. High accuracy high integrity train positioning based on GNSS and image processing integration [C]// 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2021; 2670-2680.
- [122] WANG Y, LOU Y, SONG W, et al. Simultaneous localization of rail vehicles and mapping of surroundings with LiDAR-inertial-GNSS integration[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 14501-14512.
- [123] WANG Y, SONG W, LOU Y, et al. Rail vehicle localization and mapping with LiDAR-vision-inertial-GNSS fusion [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 9818-9825.
- [124] GOYA J, ZAMORA-CADENAS L, ARRIZABALAGA S, et al. Advanced train location simulator (ATLAS) for developing, testing and validating on-board railway location systems[J]. European Transport Research Review, 2015, 7(3): 1-18.
- [125] OTEGUI J, BAHILLO A, LOPETEGI I, et al. Evaluation of experimental GNSS and 10-DOF MEMS IMU measurements for train positioning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(1): 269-279.
- [126] OTEGUI J, BAHILLO A, LOPETEGI I, et al. Simulation framework for testing train navigation algorithms based on 9-DOF-IMU and tachometers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(7): 5260-5273.
- [127] VENNARINI A, SALVATORI P, MARAIS J, et al. GNSS automated virtualized test environment for RAIL (GATE4Rail) deliverable 7.3-project results / achievements for future Shift2Rail activities [D]. GATE4Rail, 2021.
- [128] STALLO C, NERI A, SALVATORI P, et al. Geo-distributed simulation and verification infrastructure for safe train Galileo-based positioning[C]// European Navigation Conference, 2020; 1-10.
- [129] OTEGUI J, BAHILLO A, LOPETEGI I, et al. A survey of train positioning solutions [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(20): 6788-6797.
- [130] STALLO C, NERI A, SALVATORI P, et al. GNSS-based location determination system architecture for railway performance assessment in presence of local effects [C]// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2018; 374-381.
- [131] LEGRAND C, BEUGIN J, MARAIS J, et al. From extended integrity monitoring to the safety evaluation of satellite-based localisation system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 155: 105-114.
- [132] 崔科, 董德存. 列车组合测速系统安全完整性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 7: 56-64.
CUI Ke, DONG Decun. Analysis of the safety integrity in integrated train speed measurement system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 7: 56-64(in Chinese).
- [133] NERI A, RISPOLI F, SALVATORI P. The perspective of adopting the GNSS for the evolution of the European train control system (ERTMS): a roadmap for a standardized and certifiable platform[C]// 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2015; 542-552.
- [134] GEFFERT A, DODINOIU A, LAN T, et al. Towards an integrity-based GNSS measurement quality model for an in-depth understanding of localization dependability [C]// European Navigation Conference, 2020; 1-10.
- [135] BEUGIN J, LEGRAND C, MARAIS J, et al. Safety appraisal of GNSS-based localization systems used in train spacing control[J]. IEEE Access, 2018, 6: 9898-9916.
- [136] HIMRANE O, BEUGIN J, GHAZEL M. Toward formal safety and performance evaluation of GNSS-based railway localisation function[J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54(2): 159-166.
- [137] HIMRANE O, BEUGIN J, GHAZEL M. Implemen-

- tation of a model-oriented approach for supporting safe integration of GNSS-based virtual balises in ERTMS/ETCS level 3 [J]. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2023.
- [138] KAZIM S A, TMAZIRTE N A, MARAIS J, et al. On the impact of jamming on horizontal protection level and integrity assessment for terrestrial localization[C]// *International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2022: 1343-1357.
- [139] NGUYEN K T P, BEUGIN J, BERBINEAU M, et al. Application of fuzzy theory for identifying the required availability of an autonomous localization unit in European train control system[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2019, 23(3): 265-281.
- [140] 帅玮玮, 董绪荣, 王军, 等. 列车定位中 GNSS 的 RAMS 研究与评估[J]. *铁道学报*, 2020, 42(6): 70-78.
- SHUAI Weiwei, DONG Xurong, WANG Jun, et al. RAMS research and evaluation of GNSS for train positioning[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(6): 70-78(in Chinese).
- [141] 莫志松, 安鸿飞. 新型列控系统列车综合自主定位技术研究[J]. *铁道学报*, 2022, 44(1): 56-64.
- MO Zhisong, AN Hongfei. Research on comprehensive autonomous positioning technology of new train control system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(1): 56-64(in Chinese).

(编辑:黄利华)