

文章编号:1005-0523(2014)01-0039-05

GNSS 列车定位有效性及安全完整性研究

刘立月

(华东交通大学软件学院,江西 南昌 330013)

摘要:基于GNSS的列车定位能够有效降低运营和维护成本,改善铁路安全。从GNSS应用于高速列车定位面临的问题入手,在分析列车定位有效性与安全完整性基础上,探讨构建以GNSS为主的多传感器组合定位模型,采用自适应的联合Kalman滤波算法,解决GNSS定位有效性问题;根据铁路安全规范,运用故障模型分析手段,探索GNSS安全标准与铁路RAMS规范内在关联机理,解决GNSS定位安全完整性问题,为GNSS安全应用于我国高速铁路系统奠定理论基础。

关键词:列车定位;GNSS导航;组合定位;安全完整性

中图分类号:TP212;U283

文献标志码:A

GNSS(全球导航卫星系统)可提供全天候、全球范围的4维位置精确信息,在车载、航运、军事等领域已获得了广泛的应用^[1]。相比传统定位方法,GNSS具有低成本、连续高精度定位的先天优势,能够在一定程度上满足现代铁路的高效监控、连续高精度定位要求^[2-3]。然而,列车运行控制系统是安全苛刻系统,通常遵循安全完整性等级(safety integrity level, SIL)最高安全4级要求,单独依赖GNSS定位是无法满足的^[4]。目前,GNSS在铁路上的应用还处于初级阶段,大多适用在中低速、低密度线路的信号系统控制,如我国2006年开通的青藏铁路。随着我国铁路高速发展,高速列车及高密度线路越来越多,这对列车运行的安全提出了更高要求。GNSS应用于现代铁路,既是高速铁路技术发展的需要,也是铁路系统降低运营成本与提高管理效率的需要,GNSS定位信息的有效性 & 安全完整性,是GNSS成功应用于现代高速铁路系统的关键^[2-7]。

1 列车定位有效性与安全完整性

根据铁路RAMS(EN50126)规范^[4],有效性是指在外部资源提供保障的前提下,在某个瞬间或给定的时间间隔,系统正常执行所需功能的能力。具体的讲,列车定位有效性就是实时精确地确定列车当前在线路中的位置的能力,定位信息的有效性(即连续性、精确性及可靠性)是保证铁路安全、发挥效率、提供最佳服务的前提。传统的列车定位方法,如轨道电路、里程计、计轴器、应答器等,可靠性高、安全性好,但建造及维护成本高,机动性差;现代的列车定位方法,如GNSS、无线定位、INS等,成本相对低,机动性强、连续性好,但可靠性有待于增强。列车定位方法各有自身的优缺点,没有一种定位技术能有效的独立解决列车定位问题^[2-3, 6-7]。多传感器组合能够有效提高列车定位系统的性能,包括容错能力、时间与空间覆盖范围、信息可信度等,是当前列车测速定位技术的重要发展方向^[8]。在组合系统中,融合算法是关键,目前大多采用Kalman滤波作为数据融合的计算方法^[5-6]。随着列车运行速度的不断提高及铁路安全的更高要求,对于

收稿日期:2013-10-25

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ12308)

作者简介:刘立月(1970—),男,副教授,硕士,主要研究方向为机器学习,嵌入式应用。

定位的有效性及安全完整性方面的性能需求也在不断提高,常规的线性 Kalman 滤波有待进一步改进,以便适合高速列车运行过程中非线性特性的数据融合。

GNSS定位的安全完整性是基于列车安全需求提出的。根据铁路RAMS规范,安全完整性是指在规定的时间内及规定的条件下,一个系统较好的实现所要求的安全功能的概率。在GNSS定位的安全完整性方面,目前主要有两类研究方法,一是采用组合系统中广泛使用的容错设计及故障检测与隔离法,如 χ^2 检验法及二取一判决法($1\infty 2D$),其中, $1\infty 2D$ 可追踪到故障的来源,并可评估系统安全性。二是采用GNSS定位完整性增强法,如欧洲的EGNOS,美国的WAAS,及多星座联合(如中国北斗+GPS)等外部增强手段,以及GNSS接收机自主监测方法(RAIM)^[9]。近年来,一些欧洲铁路应用标准和IEC国际标准主要从铁路RAMS出发,定义了列车运行控制系统应用的安全规范^[2]。

2 基于GNSS的组合定位平台

2.1 组合定位平台构建

在列车组合系统中,利用GNSS定位优势,构建以GNSS定位为主,辅以惯性传感器、轨道电路及查询应答器相结合的多传感器组合定位平台,如图1。平台分为四个部分,各部分共同协作,完成组合定位系统功能需求。①采集层:以GNSS,惯性传感器、轨道电路及查询应答器组成底层数据采集通道,通过测量冗余,确保数据的连续性。②逻辑层:以GNSS采集数据为主,采用并联的 $1\infty 2D$ 结构,实现故障检测与隔离,确保数据的可靠性。③融合层:对不同通道的数据进行融合,选择合适的融合算法,输出最优的定位信息,确保数据的精确性。④应用层:对融合估计的数据进行安全完整性检测与评估,确保输出数据的完整性。

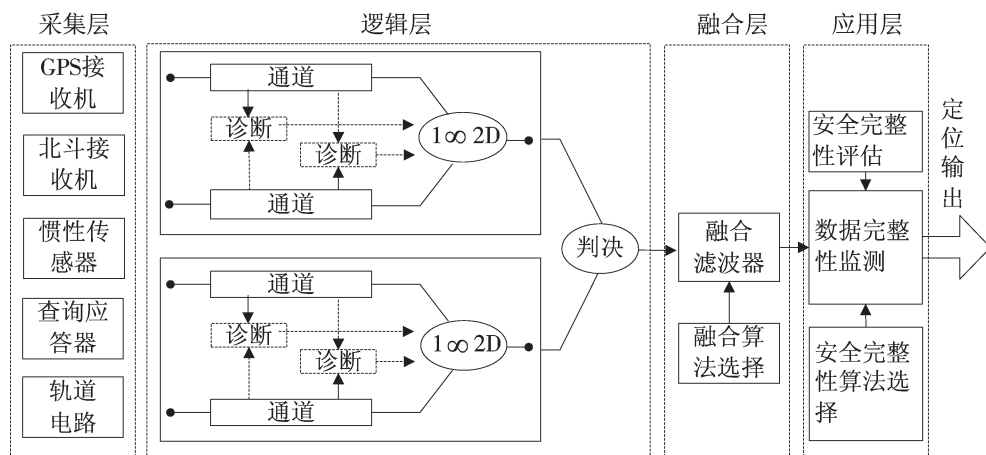


图1 列车组合定位平台

Fig.1 Train integrated positioning platform

2.2 联合滤波器设计

组合定位的核心是数据融合,其中,融合算法是其有效实施的关键,系统采用带反馈的联合 Kalman 滤波,如图2。在联合滤波中,对GNSS、惯性传感器和轨道电路等传感器采集的数据分别处理,形成多个子滤波器,各子滤波器独立并行工作,通过主滤波器进行时间更新与信息融合,给出最优融合估计,同时,将输出信息反馈给各子滤波器,实现组合定位自适应的联合 Kalman 滤波。

在图2中, $\hat{X}_i, P_i$ 分别表示某一时刻,第*i*个滤波器的估计值与方差, β_i 为信息分配系数。联合滤波的计算过程:①对所有子滤波器与主滤波器之间进行系统信息分配;②子滤波器和主滤波器的时间更新;③对各子滤波器进行信息更新;④主滤波器直接进行数据融合,输出最优融合信息,并反馈给各子滤波器,以便修正。

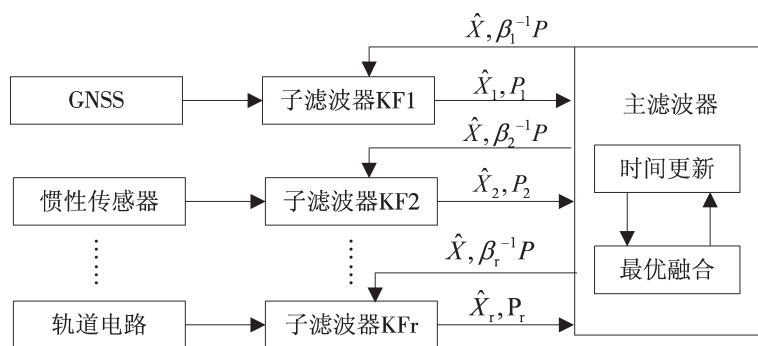


图2 组合定位联合滤波器

Fig.2 Federal Kalman filtering for integrated positioning

3 GNSS 安全标准与评估

3.1 GNSS 安全标准融入 RAMS 规范

安全完整性监测与评估是保障基于GNSS的列车组合定位系统完整性的有效手段。GNSS安全标准主要依据航空领域安全要求制定的,与铁路RAMS属性之间存在差异。如何在RAMS规范与GNSS测量质量之间建立联系,RAMS如何考虑GNSS数据完整性处理以及确保局部非完整性数据不良传播的影响等,都需要引入新的协调机制。因此,GNSS安全标准融入RAMS规范是GNSS应用于列车安全定位面临的首要问题。

GNSS安全服务(如Galileo SoL-A)采用航空质量术语来描述规范。尽管基于不同的安全体系,SoL-A也可以用于铁路系统。根据铁路CENELEC(欧洲电子标准化组织)标准,建立Galileo质量标准与RAMS规范之间联系。对GNSS安全质量,提供一套基于故障模式与RAMS规范的铁路安全理论分析方法,转化为RAMS来描述,如图3,以供基于GNSS的铁路安全系统设计、认证与确认。

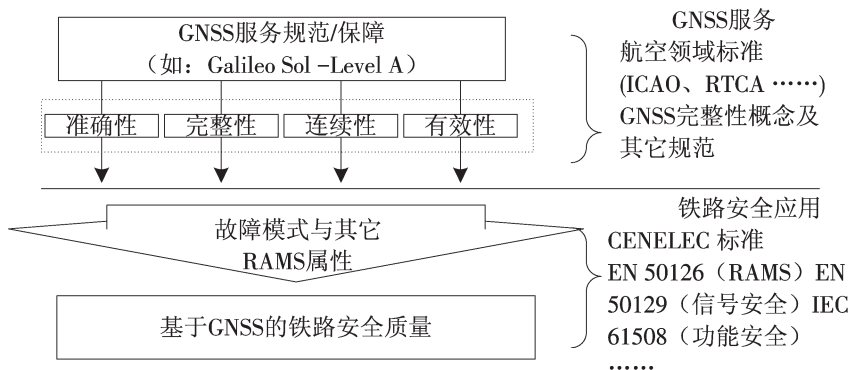


图3 GNSS服务融入铁路安全应用

Fig.3 GNSS services merged into railway safety

3.2 GNSS的铁路RAMS风险评估

在GNSS列车定位系统中,应用安全故障诊断机制,对安全及危险状态随机故障模式进行分析,正常的系统工作状态为安全(Safety)和危险(Danger)2种。系统的故障状态(概率)通常有4种: PF_{du} 为危险状态未检测到故障概率; PF_{su} 为安全状态未检测到故障概率; PF_{do} 为危险状态检测到故障概率; PF_{so} 为安全状态检测到故障概率。根据系统随机故障概率,结合RAMS规范,建立风险评估模型,如图4。

主要风险指标(与时间有关),包括:完整性风险 $IR(t)$, 连续性风险 $CR(t)$, 可靠性 $R(t)$ 及有效性 $A(t)$ 。其

中, $IR(t) = PF_{DU}(t)$, $CR(t) = PF_{DD}(t) + PF_{SD}(t)$ 。根据RAMS规范, 可靠性 $R(t)$ 是指正常运行时间间隔内正确的故障诊断与定位性能, $R(t) = 1 - (PF_{DU}(t) + PF_{SD}(t))$; 有效性 $A(t)$ 是基于可靠性与可维护性 $M(t)$ 定义的, $A(t|M(t)) = 1 - (PF_{DU}(t) + PF_{SD}(t)) \approx 1 - (IR(t) + CR(t))$ 。GNSS可信性建立在RAMS规范中的有效性基础上的, 安全完整性是基于可信性、连续性风险及完整性风险的综合结果。对于GNSS列车组合定位系统, 安全完整性就是确保系统不出现不可以接受的危险, 或者说将危险控制在用户定义的可以接受的误差范围内。

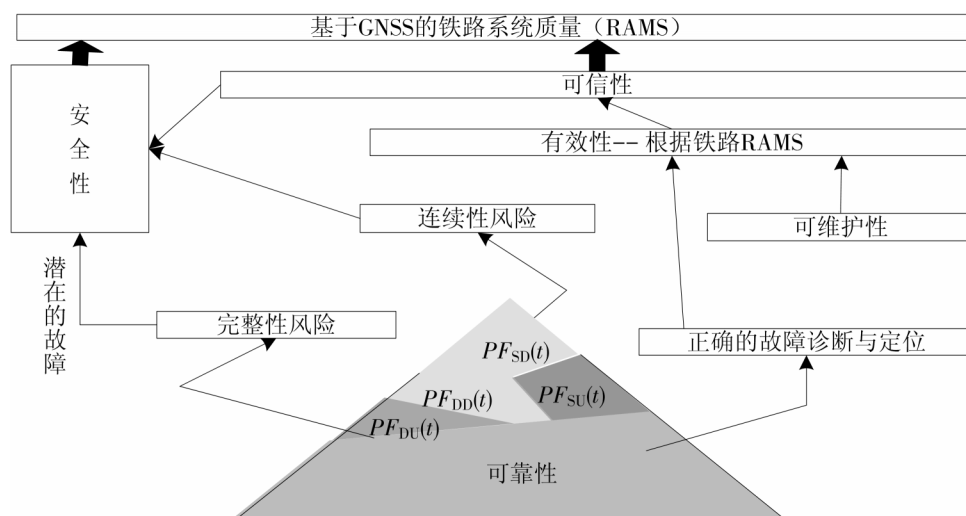


图4 基于GNSS铁路RAMS风险评估模型
Fig.4 Risk evaluation model based on GNSS railway RAMS

4 结束语

GNSS应用于铁路,是现代铁路发展的需求,同时也是GNSS在安全领域应用的拓展。铁路运行控制系统是安全苛刻性系统,对于我国快速发展的高速铁路系统,应用GNSS定位面临许多机遇与挑战。针对GNSS应用于高速列车定位面临的问题,探讨了列车定位有效性与安全完整性解决方案及相关策略,下一步将深入研究安全完整性监测及评估方法,并进行风险评估定量分析,为GNSS安全应用于高速列车定位奠定基础。

参考文献:

- [1] WIKIPEDIA. Global navigation satellite system [EB/OL]. [2013-07-20]. <http://en.wikipedia.org/wiki/GNSS>, 2012.
- [2] JULIE BEUGIN, AFILI P, JULIETTE MARAIS, et al. Galileo for improving railway operations: question about the positioning performances analogy with the RAMS requirements allocated to safety applications[J], European Transport Research Review (ETRR), 2010, 2(2): 93-102.
- [3] 王剑. 基于GNSS的列车定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [4] CENELEC. EN 50126 Railway applications-the specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety(RAMS)[S]. Genva: International Electrotechnical Commission, 2002.
- [5] PEKKA SALMI, MARKO TORKKELI. Inventions utilizing satellite navigation systems in the railway industry. an analysis of patenting activity [J]. Journal of Technology Management & Innovation, 2009, 4(3): 46-58.

- [6] 胡辉,方玲,雷明东等. GPS接收机C/A码跟踪算法及环路控制策略[J],华东交通大学学报,2013,30(1):64-70.
- [7] 刘江,蔡伯根,唐涛等. 基于GPS与惯性测量单元的列车组合定位系统[J]. 中国铁道科学,2010,31(1):123-128.
- [8] Juliette Marais, Jan Poliak, George Barbu. Galileo in Railways [EB/OL]. [2013-07-01]. <http://www.itst2007.eure.com.fr/site/var/html/h1053/file1197.pdf>,2007.
- [9] 钱华明. 故障诊断与容错技术及其在组合导航系统中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2004.

Availability and Safety Integrity of Train GNSS Positioning

Liu Liyue

(School of Software, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: GNSS-based train positioning can effectively reduce operation and maintenance cost, improve the safety of railway. Starting from the problems of applying the GNSS to high-speed train location, based on the analysis of the existing train positioning availability and safety integrity, this paper discusses the construction of GNSS-based multi-sensors integrated positioning model, and the GNSS positioning availability through adaptive Federal Kalman filtering algorithm. According to railway safety standards, by using the failure modes analysis, it explores the internal conjunctive mechanism between GNSS safety standards and railway RAMS (reliability, availability, maintainability and safety), solving the GNSS positioning safety integrity issue, which would lay theoretical foundation for safety application of GNSS in China's high speed railway system.

Key words: train location; GNSS (Global Navigation Satellite System); integrated positioning; safety integrity