

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.003

基于卫星定位的列车完整性检查列尾设备性能测试方法

陆德彪^{1,2,3}, 孙浩¹, 张丹^{1,3}, 段国涛¹, 董皓琦¹

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 智慧高铁系统前沿科学中心, 北京 100044;

3. 北京交通大学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:针对新型列控系统向着“车载中心化”的方式发展对列车完整性检查系统功能实现安全冗余的需求,在既有列尾设备检测风压提醒司机判定列车完整性功能的基础上,提出增加基于卫星的测速定位配合车载设备实施列车完整性检查,以保障列车完整性检查功能的可靠性和可用性。由于列尾设备安装条件限制,观测环境场景为典型的“半边天”场景,因此对列尾设备进行性能测试。基于浩吉重载铁路 35.35 km 的实测数据,采用电磁仿真软件进行列尾天线方向性设计,使用卫星导航模拟器构建仿真测试场景和设计测试序列,对列尾设备的定位性能进行了评估。评估结果表明,列尾设备在设计的天线方向图场景下观测参数和定位性能参数均符合典型的“半边天”场景特征;区间动态运行仿真结果,定位精度 R95 评估结果在 BDS 模式下为 13.48 m, GPS 模式下为 9.12 m, BDS/GPS 模式下为 3.82 m, 基于 BDS/GPS 的双模定位模式在车站停车、区间运行等场景下定位精度 R95 均优于 4 m, 表明采用双模定位方式能够满足列车完整性检查列尾设备定位精度小于 5 m 的要求。

关键词:性能测试;卫星导航仿真;列尾设备;列车运行控制系统;列车定位

中图分类号:U284, V19

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2023)04-0037-11

End-of-train device performance test method by GNSS-based train integrity monitoring system

LU Debiao^{1,2,3}, SUN Hao¹, ZHANG Dan^{1,3}, DUAN Guotao¹, DONG Haoqi¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China;

2. Frontiers Science Center for Smart High-speed Railway System, Beijing, 100044, China;

3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In view of the development of the Next Generation Train Control (NGTC) towards "on-board centric" approach, the train integrity monitoring system (TIMS) needs to achieve safety redundancy. Existing End-of-Train (EOT) devices detect wind pressure and remind the driver the integrity of the train. On this basis, adding GNSS-based EOT is proposed to implement reliability and availability of TIMS. Due to the limited installation conditions of EOT, the observation envi-

收稿日期:2023-06-30;修订日期:2023-07-02

基金项目:国家自然科学基金(62027809);北京市自然科学基金(L211004);国家重点研发计划(2022YFB4300500);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);北京市自然科学基金(4232031)

作者简介:陆德彪(1986-),男,副教授,主要从事基于卫星定位的列车运行控制方面的研究。

ronment scenario is the typical "half sky". Performance tests of the end-of-train devices are therefore necessary. Based on the field collected data of 35.35 kilometers along Haoji Heavy-haul Railway, the antenna radiation pattern of the EOT antenna is designed using HFSS. Simulation test scenarios and design test sequences are built using satellite navigation simulators, and EOT localization performance is analyzed. The evaluation results show that the observation and performance parameters of EOT in the designed antenna pattern array are in line with the "half sky" characteristics; and the dynamic operation simulation points out that, the positioning accuracy results with R95 evaluation are 13.48 m in BDS mode, 9.12 m in GPS mode, and 3.82 m in BDS/GPS mode. The accuracy with R95 of the BDS/GPS mode is better than 4 m in scenarios such as in station and in block operations, which shows that the BDS/GPS mode positioning meet the requirement of less than 5 m positioning accuracy of EOT for TIMS.

Key words: Performance test; GNSS simulation; End-of-train device; Train control system; Train localization

0 引言

随着铁路的快速发展,运输系统对于铁路网络的通过能力、运输效率、设备管理和维护等方面提出了新的需求。以CTCS-3和CTCS-2级(Chinese train control system, CTCS)为代表的列控系统结构复杂,设备间信息交互繁琐,轨旁设备较多^[1]。列控系统技术的演进致力于缩短列车运行间隔、减少轨旁设备,进而由车载设备完成列车定位和列车完整性检查功能。中国和欧盟分别在已有的列控系统架构上提出了新型列控系统(next generation train control, NGTC)^[2]。NGTC主要研究并实现基于无线通信的移动闭塞或相对闭塞技术、融合卫星导航的多源列车定位技术以及基于车载自主的列车完整性检查技术等^[3-4]。

列车完整性检查是指列车在行车过程中对列车整体连接的完整性进行检查,以确保列车在行车过程中的安全性和稳定性^[5]。NGTC中基于车载自主的列车完整性检查技术指不依赖于轨旁设备如轨道电路等,采用机车至最后一节车厢的硬连接方式(风压或列车总线)以及自主列车首尾测速定位的方式实现完整性检查功能^[6]。欧洲X2Rail-2计划下SCOTT项目中提出了基于无线方式实现列车完整性检查的方法,包括了基于卫星导航的方法^[7]。随着北斗卫星定位系统的精度的提高,应用北斗实现列车完整性检查可保障列车完整性检查的实时性和安全性^[8-9]。

在基于卫星定位的列车完整性检查中,列尾设备在实际应用前需要在实验室条件下进行对应工

作环境场景下的卫星定位功能及性能测试。在列尾观测环境仿真方面,国内外的实验室大多采用3D建模、环境图像建模以及激光雷达点云建模等技术构建模型,从而模拟卫星信号传播路径并实现卫星定位接收机信号接收环境的仿真^[10]。基于典型铁路运行场景(如森林、隧道等环境)进行实验室模拟分析,比较模拟位置 and 实际位置,计算误差值并将其与精度阈值进行比较分析,从而评估定位性能^[11]。安毅等人针对GPS天线安装在车钩处,GPS卫星信号被车厢遮挡定位下降的问题提出了一种基于GPS和虚拟卫星组合定位完成列车完整性检查的方法^[12]。杨安利用Apriori关联分析算法对列尾设备观测卫星的特征参数进行关联分析,建立列尾设备卫星定位受限环境场景模型^[13]。因此,通过大量数据进行关联性分析建立天空图模型,在实验室仿真过程中需要基于观测卫星、天空图模型对卫星进行可见性操作,实时仿真过程较为困难。构建定位设备天线的方向性图,可以实现任意仿真轨迹上卫星可见性仿真,在此基础上进行符合列尾设备技术条件的卫星可见性仿真,形成测试案例,可有效服务于列尾设备在不同运行线路的通用性功能和性能测试。

本文针对列尾的卫星定位接收天线方向性进行仿真设计,在实验室环境下建立列尾观测受限场景并开展基于测试序列的规范仿真和测试。通过定位精度评估方法,评估列尾设备在受限场景下的定位精度,旨在构建基于卫星定位的列尾设备通用性功能、性能仿真测试和评估方法,为开展新型列控系统实验室仿真测试提供设备级仿真条件。

1 列车完整性检查

1.1 新型列控系统对列车完整性检查的要求

根据 ERTMS/ETCS 系统需求规范的 Subset-026 和中国《CTCS 技术规范总则》的要求,通过无线闭塞中心(radio block center, RBC)和车载验证系统共同完成列车定位和列车完整性检查。目前的列尾设备可以通过检测风管漏风情况来判断列车的完整性,当列车分离时,风管断开漏风,泄漏量超过规定阈值时,列尾设备会向监测系统发出告警信息,提示驾驶员注意列车运行状态。并且,当前列尾属于车务系统,纳入列车运行控制系统需考虑列车完整性检查的可信性,因此按照新型列控系统的设计,列车完整性检查功能应该符合以下条件:

- 1)列车完整性检查列尾设备能够向车载主机实时传输列车完整性的状态情况。
- 2)车载设备能够根据列尾信息向无线闭塞中心发送准确的列车位置信息。
- 3)列车位置信息中列车完整性信息应该经过安全校验,定位精度优于 5 m(95%)。

因此,引入基于卫星定位和风压双套冗余的列车完整性检查列尾设备可以保障列车运行过程中,基于 GSM-R 网络传输列尾测速定位信息和风压信息至车载主机,满足完整性检查功能的 3 个条件。

1.2 基于卫星定位的列车完整性检查

新型列控系统的列车完整性检查列尾设备(以下简称“列尾设备, end-of-train device, EOT”)引入了基于卫星的车载无源定位方式。如图 1 所示,列尾设备采用硬件安全比较架构,包含风压检测、测

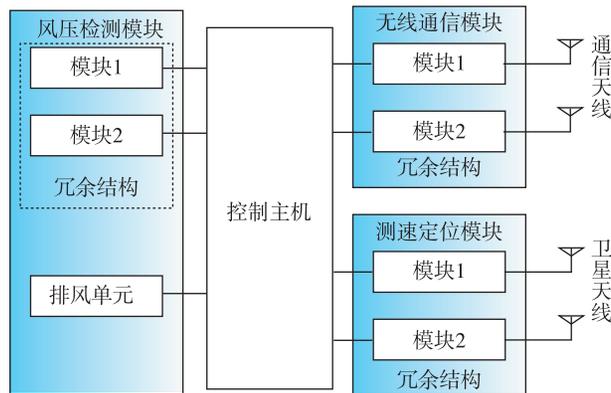


图 1 安全型列尾设备构成示意图
Fig. 1 EOT safety structure composition

速定位、无线通信和控制主机。

风压检测模块通过比较双路风压一致性校验列车完整,测速定位通过双路测速定位模块检查测速定位误差是否满足阈值范围要求,然后将列尾设备的风压和测速定位信息传输至车载 ATP 主机,最后由车载主机实现列车完整性安全校验。

因此在列首 ATP 车载设备主机、列尾设备均增加基于卫星导航的测速定位模块,车载 ATP 设备主机接入的卫星导航天线位于机车顶部;列尾的天线内置于列尾设备,因货车车厢安装条件限制,列尾只能安装在最后一节车厢后侧车钩位置,车厢对列尾天线造成遮挡,因此列尾的卫星观测环境为典型的“半边天”环境场景。如图 2 所示,列尾设备观测到的卫星信号数量比被测车载 ATP 设备(简称“列首设备, head-of-train device, HOT”)少近一半,因此列尾观测到的卫星几何精度因子(horizontal dilution of precision, HDOP)增大,导致定位误差随之增大。

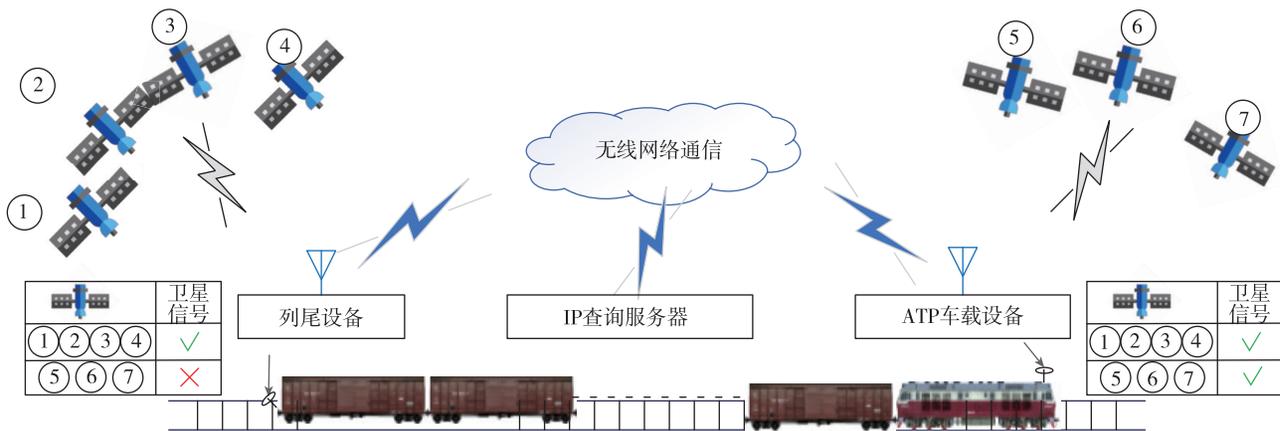


图 2 列尾设备和列首设备卫星观测状态示意图

Fig. 2 Satellite observation illustration for EOT and HOT

基于上述列尾设备卫星观测受限的情况,再加上实际列车运行过程中经过车站、山体及城市等多种环境场景,导致卫星定位信号观测场景不可控,因此在列尾设备投入铁路现场使用之前,需要在实验室条件下进行列尾观测卫星场景的仿真,对基于卫星的列尾定位性能进行测试,验证其场景适应性和定位精度,从而确保列尾设备在实际列车运行中能够准确地获取位置和速度信息,为 ATP 车载设备提供必要的信息以保障列车的运行安全。

2 基于卫星定位的列尾设备环境特征构造

2.1 列尾设备卫星信号接收环境

列尾设备一般安装在最后一节货车车厢的尾部,列尾设备与列车车钩相连接用于固定设备,同时连接尾部风压管,如图 3 所示。因列尾设备安装位置为车厢后侧,车体对列尾设备天线造成遮挡,导致列尾观测卫星数量下降,可能导致定位观测几何布局下降,带来较大定位误差。因此,需要对列尾观测卫星环境场景进行实验室仿真环境下仿真和性能测试。



图 3 列尾设备车厢安装位置示意图

Fig. 3 EOT installation area on the cargo

列车运行过程中因轨道走向导致列车运行的航向角动态发生变化,导致列尾设备观测的卫星数量随着列车运行、遮挡的方位变化带来变化,并且随着列车运行经过不同的环境场景,观测的卫星数量、几何分布均动态变化,如图 4 所示。因此,构造列尾观测场景需要建立列尾受车体遮挡的天空图特征,并在此基础上基于卫星导航星历、电子轨道地图进行观测卫星的实时生成。列尾观测的天空图依据观测天空可见性和遮挡特性采用天空遮挡特性(feature of sky occlusion, FSO)进行参数化特征描述^[14]。

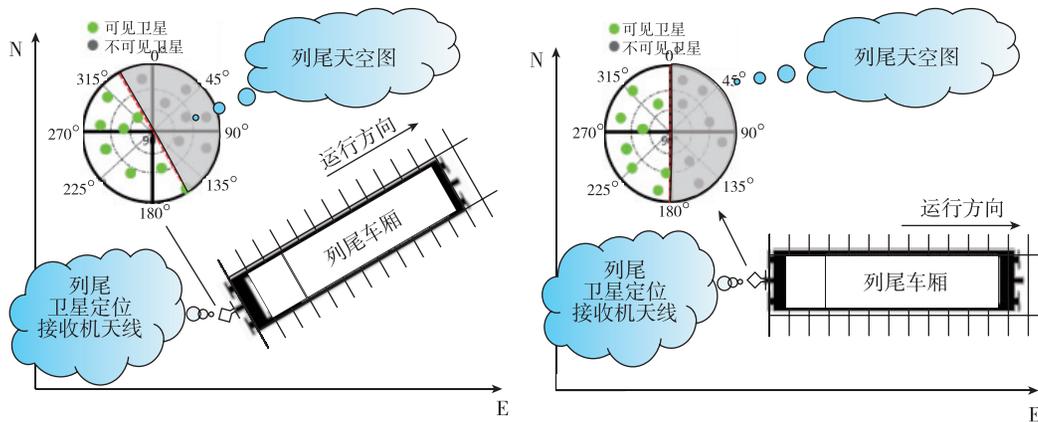


图 4 不同运行方向下列尾天线观测天空图

Fig. 4 EOT antenna skyplot under different operation directions

2.2 列尾天线方向性设计

为了分析车厢的遮挡对列尾设备接收卫星导航信号实现列车完整性检查功能的具体性能,使用 ANSYS 公司的 HFSS (high frequency structure simulator) 软件进行列尾天线的天空方向图仿真。HFSS 软件采用有限元 (FEM) 方法求解电磁场问题,进行电磁场的三维建模仿真。在 HFSS 天线仿真中,通过在天线的某一方向设置与地面垂直的理

想导体边界,模拟尾部车厢对天线接收信号的遮挡情况,保证大地和所设置的车厢平面二者之间没有因为边界条件不同产生互相之间的影响。如图 5 所示,列尾设备天线为右旋圆极化矩形天线,按照列尾设备安全性的要求,设备内部共有 2 根天线。

通过图 5 的天线尺寸结构、天线手册提供参数,确定仿真所需的参数如表 1 列尾天线特性参数所示。

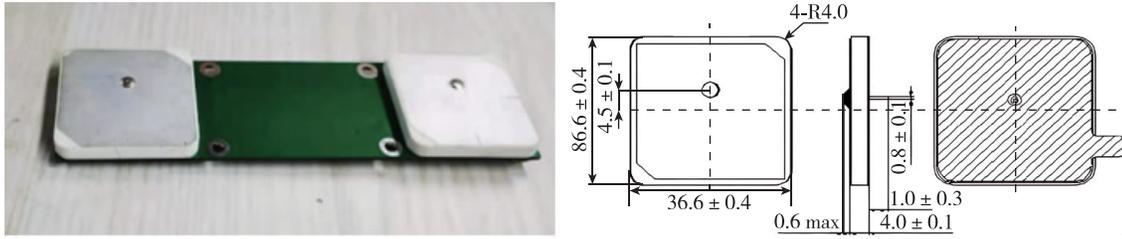


图 5 列尾设备天线尺寸示意图

Fig. 5 EOT antenna & parameters

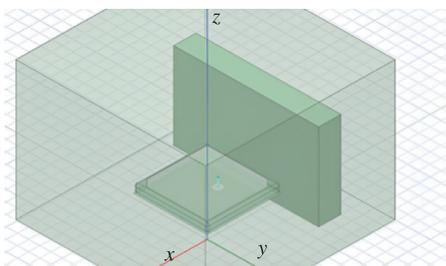
表 1 列尾天线特性参数

Tab. 1 EOT antenna characteristic parameters

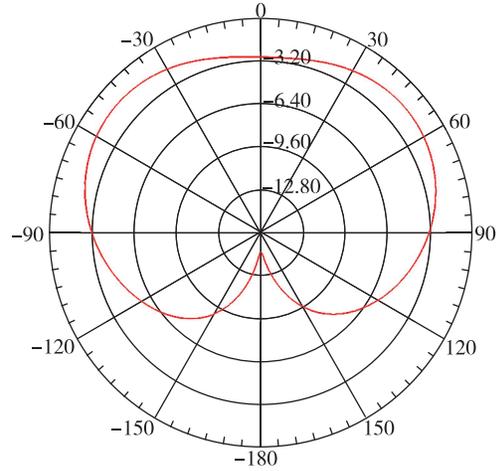
特性参数	参数值
频率范围	1.56~1.58 GHz
介质板介电常数	6.5
极化模型	RHCP(右旋圆极化)
馈电方式	单点同轴馈电
介质基板	Al ₂ O ₃
天线-10 dB的带宽	≥15 MHz
介质板厚度	4 mm
天线尺寸	35 mm×35 mm

通过上述右旋圆极化矩形微带天线的结构尺寸,在 HFSS 软件中构建天线仿真模型,按照有车体遮挡和无车体遮挡两种场景进行仿真,仿真场景如图 6 所示。

基于相应仿真场景,在 HFSS 仿真软件中卫星导航信号的频点进行仿真分析,形成对应的天线方向性特征,列尾天线观测的天空图导致方向性图为非全向性,因遮挡导致了畸变。由此基于模拟仿真的列尾天线方向图构建列尾观测环境并生成天线接收信号增益矩阵。



(a) HFSS 仿真天线模型



(b) 列尾天线方向图

图 6 基于 HFSS 设计矩形微带天线模型及列尾天线方向图

Fig. 6 Rectangular microstrip antenna model based on HFSS and EOT antenna pattern

3 列尾设备观测环境场景仿真方法

3.1 面向场景仿真的列尾观测环境构建

根据图 6 的 HFSS 列尾设备天线的仿真结果,以天线方向性参数为输入,作为模拟参数输入至 GNSS 模拟器中,模拟列车运行中的列尾设备观测的天空图(skyplot)。基于实际卫星天线接收信号场景,天线和卫星之间的相对位置可以通过俯仰角 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ 和方位角 $\varphi \in [0^\circ, 360^\circ]$ 来表示,天线本体坐标系及天线方向图定义如图 7 所示。

为了准确描述天线接收卫星导航信号的增益,将俯仰角和方位角通过 1° 的间隔进行分割,形成天线方向增益矩阵 \mathbf{A} ,用式(1)表示。

$$\mathbf{A}_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

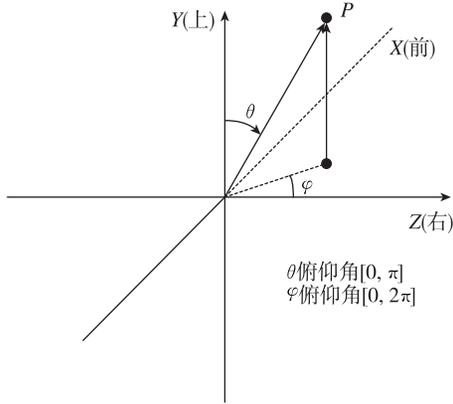


图7 天线本体坐标系及天线方向图定义

Fig. 7 Antenna coordinate system definition and antenna pattern

其中, $m = 180; n = 360, 0 < i < m, 0 < j < n$; a_{ij} 表示天线接收来自相对于天线俯仰角为 θ_i 、方位角为 φ_j 的卫星的平均信号增益。

由于卫星轨道与天线本体距离可认为无穷远,在同一方位角下,天线的俯仰角方向信号增益相同。利用 HFSS 软件仿真生成的天线方向图,取每个平面方位角的信号增益值,生成式(1)天线方向增益矩阵的参数,构造满足GNSS卫星导航模拟器

格式要求的用户天线方向图参数格式文件(按比例因子 100 进行 $A_{m \times n}$ 放大),生成的用户天线及方向性图参数(局部)如图 8 所示。



图8 基于列尾天线方向性生成的增益参数

Fig. 8 Gain parameters triggered by EOT antenna pattern

3.2 基于卫星导航模拟器的列尾观测场景生成

基于卫星信号模拟器的列车定位精度测试平台由仿真数据生成系统、GNS8460 信号模拟发生器、模拟器控制系统、被测车载 ATP 设备(简称“列首设备”)、列尾设备及定位精度后处理系统组成,测试平台的连接方式如图 9 所示。

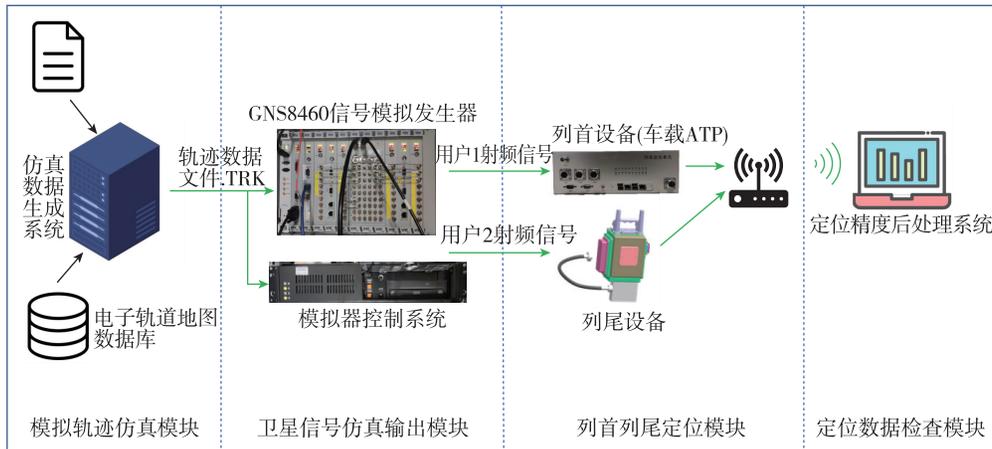


图9 基于卫星信号模拟器的列车定位精度测试平台

Fig. 9 GNSS-based EOT/HOT localization accuracy test platform

通过 GNSS 模拟器操作系统向卫星导航模拟器注入列车运行轨迹参数,包括基于电子轨道地图对应的线路信息生成的列车运行三维位置、速度和天线方向性参数,卫星的系统时间、星历信息,从卫星和列车运行两个方面形成的仿真参数输入至仿真平台。列首定位设备和列尾设备通过不同方式接收模拟生成的卫星导航信号,并计算对应位置信息和观测参数,通过定位精度后处理系统与仿真输

入的列首和列尾设备位置信息比较,进行不同观测卫星场景下的精度分析。总体的仿真测试流程结构如图 10 所示。

4 列尾定位性能测试方法

4.1 仿真数据及测试流程

为验证生成的天线方向图的正确性和仿真测试平台构造场景的性能,采用真实列车在浏阳站至

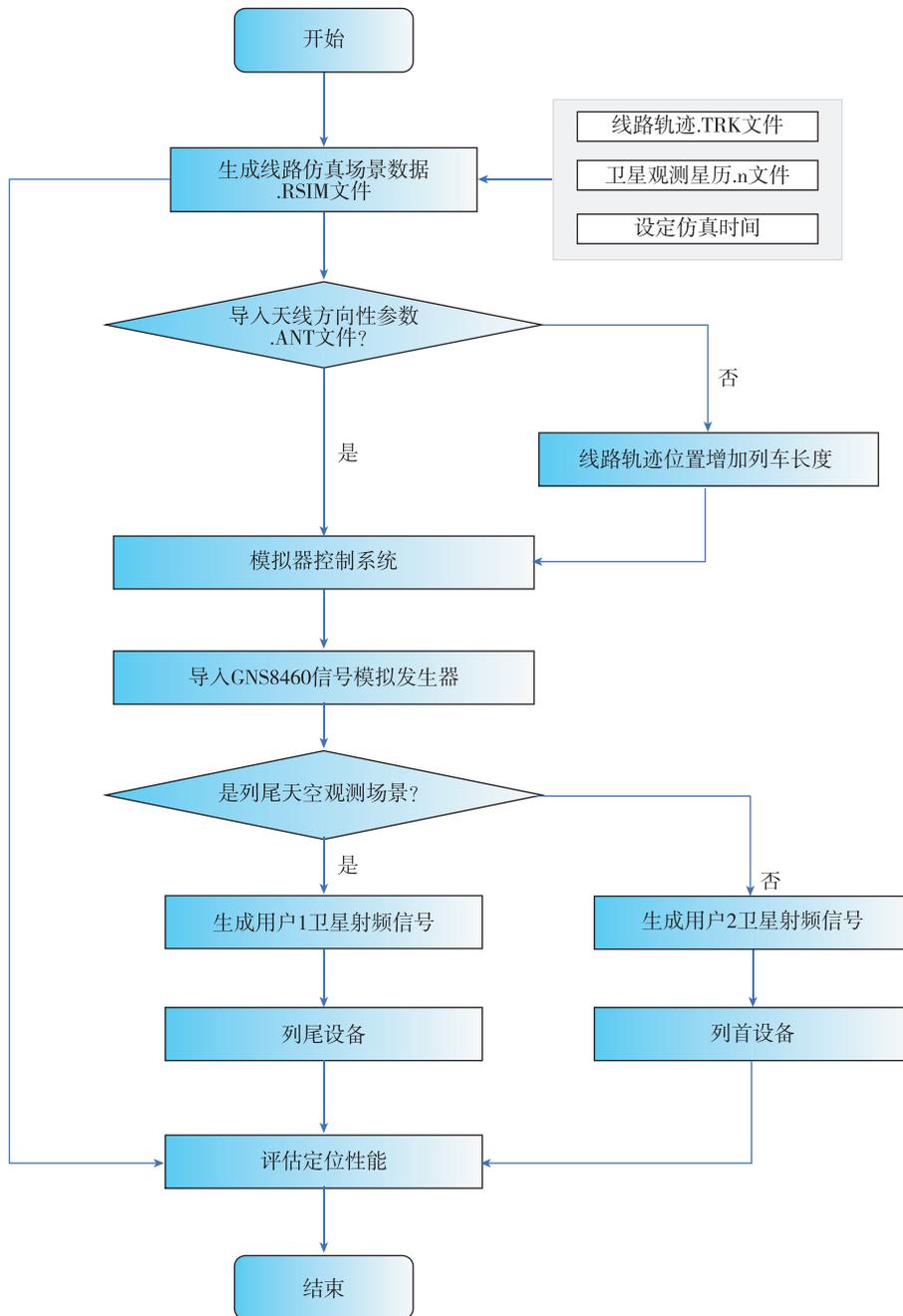


图 10 基于 GNS8460 模拟器定位性能仿真测试流程图

Fig. 10 Simulation & test flowchart of localization performance based on GNS8460 GNSS simulator

大茅站(K1596+650-K1561+300)共计 35.35 km 的浩吉铁路货运线路上采集的数据,生成列首和列尾设备运行轨迹数据。根据列首和列尾设备的实际工作场景和天线方向性,列首设置无遮挡场景,列尾设置为第 2 部分通过 HFSS 生成的天线方向性参数,卫星导航模拟器列车行驶最高速度为 80km/h。卫星导航模拟器的配置包括:信号频点为北斗 B1I 和 B2I 频点、GPS 的 L1 和 L5,仿真轨迹为 120 s 的静态(用于初始定位)、浏阳站停车 3 min、浏阳站-大茅站区间行驶 27 min,仿真轨迹数据的基

本信息如表 2 所示。

表 2 仿真轨迹场景信息统计表

Tab. 2 Simulated trajectory information statistics

场景	仿真距离/m	仿真时间/s	仿真频率/Hz
浏阳站停车	0 (静止)	180	5
浏阳站-大茅站 区间运行	35 350	1 620	5

为验证列首和列尾设备分别在开阔场景、受车体遮挡场景下,接收设备在 BDS 模式、GPS 模式和

BDS/GPS 双模 3 种工作模式下单点定位的性能,列首和列尾设备均采用 Ublox M8N 接收机,接收卫星导航模拟器输出的列首、列尾卫星导航信号。Ublox M8N 接收机配置为单点定位方式,接收机配置部分参数如表 3 所示。

在本次实验中,我们模拟列首和列尾两个定位设备,在两种列车运动状态下,对 3 种卫星定位模式下进行了共计 6 次实验评估定位性能,如表 4 所示。

表 3 Ublox M8N 接收机参数设置

Tab. 3 Ublox M8N GNSS receiver parameter settings

参数设置/ 定位模式	BDS 模式	GPS 模式	BDS/GPS 双模
频点	B1I、B2I	L1、L5	B1I、B2I、L1、L5
截至高度角/(°)	10	10	10
数据输出频率/Hz	1	1	1

表 4 列尾设备和列首设备在不同定位模式下的仿真测试序列

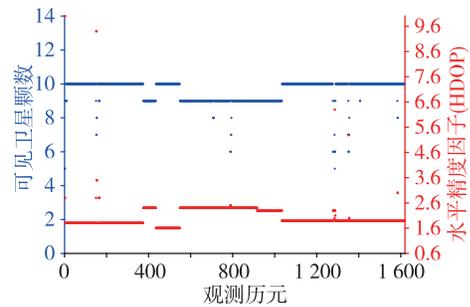
Tab. 4 EOT/HOT test cases in different positioning modes

序列编号	测试对象	案例名称	测试内容	测试次数
HOT-PS-01	列首设备	BDS 模式 定位性能测试	列车按照仿真场景设定的运行过程,浏阳站停车 3 min,浏阳站-大茅站区间运行 27 min,共计测试 30 min。分析不同定位模式下观测的卫星数量(SV)、HDOP、定位误差参数,评价定位性能。	1
HOT-PS-02	列首设备	GPS 模式 定位性能测试		1
HOT-PS-03	列首设备	BDS/GPS 双模 定位性能测试		1
EOT-PS-01	列尾设备	BDS 模式 定位性能测试	列车按照仿真场景设定的运行过程,浏阳站停车 3 min,浏阳站-大茅站区间运行 27 min,共计测试 30 min。分析不同定位模式下观测的卫星数量(SV)、HDOP、定位误差参数,评价定位性能。	1
EOT-PS-02	列尾设备	GPS 模式 定位性能测试		1
EOT-PS-03	列尾设备	BDS/GPS 双模 定位性能测试		1
仿真序列总数				6

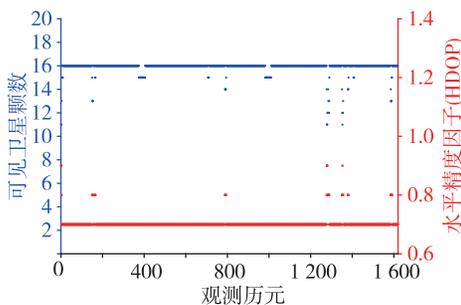
4.2 仿真定位精度评估

通过仿真平台获得的 6 个测试序列的结果,进行静态/动态场景、BDS/GPS 不同定位模式下的定位性能评估。定位误差采用均值 μ 、标准差 σ 以及圆概率误差 95%(R95)3 个参数进行评估^[15]。

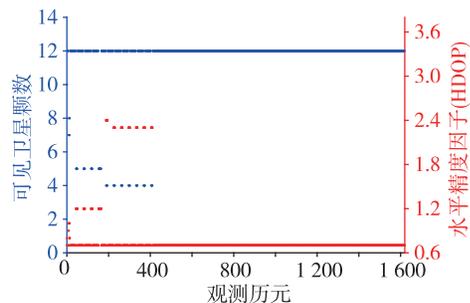
针对 6 个测试序列动态运行过程的测量结果,对观测的可见卫星数量(SV)、水平精度因子(HDOP)进行了比较,如图 11 所示。



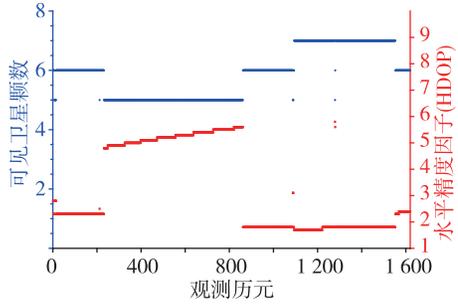
(b) BDS 模式下列尾设备卫星观测状态



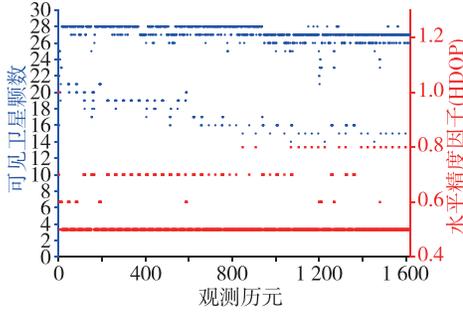
(a) BDS 模式下列首设备卫星观测状态



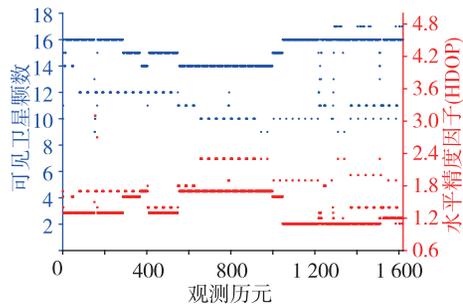
(c) GPS 模式下列首设备卫星观测状态



(d) GPS 模式下列尾设备卫星观测状态



(e) BDS 和 GPS 双模下列首卫星观测状态



(f) BDS 和 GPS 双模下列尾卫星观测状态

图 11 列车行驶状态下列首和列尾定位可见卫星数和水平精度因子(HDOP)

Fig. 11 Satellite visible numbers (SV) & HDOP for EOT/HOT under train dynamic operation

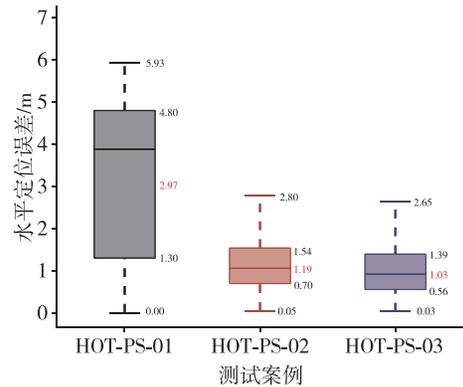
列首设备观测环境未设置天线方向性增益参数,环境为无遮挡开阔场景,从列首和列尾设备的平均可见卫星数来看,不管是在列首 3 个测试序列、列尾 3 个测试序列中,列首设备可见卫星数量比列尾设备可见卫星数量多近 1 倍,符合车体遮挡带来的天空遮挡场景特征。类似地,HDOP 值在列尾设备的 3 个测试序列中测试结果均大于 1,亦符合因车体遮挡带来的卫星几何分布不良带来的 HDOP 增大现象。特别地,EOT-PS-03 测试序列中列尾设备工作模式为 BDS/GPS 双模定位,其 HDOP 值均值为 1.41,与 EOT-PS-02 相比,减小超过 50%,从定位原理角度来看,EOT-PS-03 定位精度比 EOT-PS-02 有较大提升,见表 5。

表 5 列首和列尾设备在不同定位模式下的 SV 和 HDOP 均值

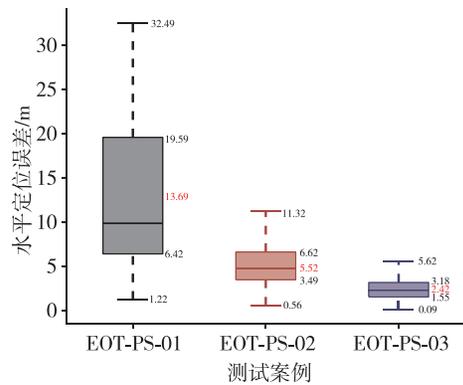
Tab. 5 Average SV and HDOP values for HOT/EOT in different positioning modes

测试序列编号	平均可见卫星数	HDOP 均值
HOT-PS-01	16	0.70
HOT-PS-02	12	0.76
HOT-PS-03	26	0.53
EOT-PS-01	9	2.05
EOT-PS-02	6	3.06
EOT-PS-03	14	1.41

同时对 6 个仿真序列中,区间运行部分的水平方向(北向/东向)定位误差进行了分析,如图 12 所示。在 HOT-PS-01/HOT-PS-02 场景下,列首设备的水平方向定位误差均值分别为 2.97 m 和 1.19 m。而在 EOT-PS-01/EOT-PS-02 场景下,列尾设备的水平方向定位误差均值分别为 13.69 m 和 5.52 m。由于车体遮挡的原因,列尾设备的水平方向定位误差均值



(a) 列首水平方向误差箱线图



(b) 列尾水平方向误差箱线图

图 12 列车行驶状态下的列首和列尾定位设备水平方向误差箱线图

Fig. 12 Horizontal error box line diagram for HOT/EOT in train dynamic operation

分别增加了 10.72 m 和 4.33 m,这符合上文提到的,由于可见卫星数目减少和卫星几何分布不良等因素,导致 HDOP 值增大所带来的水平方向误差增大的现象。在 EOT-PS-03 测试序列中,列尾设备的水平方向定位误差均值为 2.42 m,相较于 EOT-PS-01/EOT-PS-02 测试序列,列尾设备的水平方向定位精度有了较大的提升。这证明了采用 GPS/BDS 双模定位方式可以有效地降低列尾“半边天”场景所带来的定位误差。

最后,我们依据上文所给出的定位精度评估指

标,将水平方向误差沿北向和东向进行了分解,统计了 6 个仿真序列在停车和区间行驶状态下的定位误差参数,如表 6 所示。从误差均值和标准差来看,无论是停车状态还是区间行驶状态,列尾的 EOT-PS-03 测试序列相较于 EOT-PS-01/EOT-PS-02 精度均为最优,分别为 1.87 m 和 3.82 m (R95)。EOT-PS-03 与 HOT-PS-03 相比,动态运行过程中列尾 R95 误差优于 5 m,能够满足卫星定位列尾用于列车完整性检查的功能。

表 6 列首和列尾设备在不同定位模式下的定位误差参数评价指标

Tab. 6 Positioning error evaluation for HOT/EOT

测试序列	误差均值(标准差)				R95	
	站内停车		区间运行		站内停车	区间运行
	北向	东向	北向	东向		
HOT-PS-01	1.90(1.79)	0.73(0.60)	2.76(2.01)	0.89(1.83)	3.62	3.00
HOT-PS-02	0.92(0.52)	0.85(1.15)	0.90(0.91)	0.63(0.63)	3.24	1.97
HOT-PS-03	0.63(0.55)	0.18(0.22)	0.85(0.58)	0.46(0.58)	1.38	1.70
EOT-PS-01	6.54(2.16)	1.88(0.57)	13.43(8.70)	1.69(1.03)	4.97	13.48
EOT-PS-02	1.04(1.14)	1.95(0.80)	3.22(3.90)	4.07(2.46)	2.09	9.12
EOT-PS-03	2.23(0.60)	0.55(0.60)	2.00(1.89)	0.97(1.18)	1.87	3.82

5 结论

围绕铁路列车运行控制系统列车完整性检查功能中列尾设备的安全冗余输入的需求,本文研究了基于卫星定位的列尾设备性能测试方法。列尾设备在现场测试卫星信号观测动态变化,本文探索了基于卫星导航模拟器的列尾设备性能测试方法,并基于电磁场仿真软件 HFSS 进行了天线方向性参数的仿真,模拟列尾设备在列车运行过程中的观测环境场景。

1) 基于卫星导航模拟器的列尾设备性能测试方法,模拟列车运行过程中的观测环境场景,在不同卫星定位模式下,设计 6 个测试序列对列首和列尾设备进行了定位性能分析。

2) 在列车停车状态下,列首和列尾设备的 R95 误差均小于 5 m。而在列车运行状态下,列首设备的 R95 误差均小于 3 m,列尾设备在 BDS/GPS 双模式下的 R95 误差小于 5 m。

3) 在 BDS 模式和 GPS 模式下,列尾设备的水平距离误差均值分别为 13.69 m 和 5.52 m,R95 误差分别为 13.48 m 和 9.12 m,通过 BDS/GPS 双模

方式,能够使列尾设备的水平距离误差降低至 2.42 m,R95 误差降低至 3.82 m,满足列车完整性检查对列尾设备定位精度优于 5 m 的要求。

本文提出的列尾设备性能测试方法可为新型列控系统列尾设备的定位提供测试环境和性能评价指标及数值参考,对于列车在更为复杂的列尾观测环境场景定位性能还可以进一步研究。

参考文献

- [1] 莫志松. CTCS-4 级列控系统总体技术方案研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(增刊 1): 34-40.
MO Zhisong. Research on overall technical solution of CTCS-4 level train control system[J]. Railway Signalling and Communication, 2019, 55(Supp1. 1): 34-40(in Chinese).
- [2] GURNÍK P. Next generation train control (NGTC): more effective railways through the convergence of mainline and urban train control systems[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1855-1864.
- [3] HÄRRÍ J, ARRIOLA A, ALJAMA P, et al. Wireless technologies for the next-generation train control and monitoring system[J]. 5G World Forum (5GWF), 2019

- IEEE 2nd, 2019: 179-184.
- [4] 刘宏杰,王海峰,李开成,等.一种新型列控系统方案探讨[J].铁道通信信号,2016,52(10):1-5.
LIU Hongjie, WANG Haifeng, LI kaicheng, et al. Research on a solution for new train control system [J]. Railway Signalling and Communication, 2016, 52(10):1-5(in Chinese).
- [5] 郭军强.列车完整性检查技术综述与应用展望[J].铁道通信信号工程技术,2020,17(7):84-87.
GUO Junqiang. Overview and application prospect of train integrity inspection technology[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2020, 17(7):84-87(in Chinese).
- [6] 崔俊锋.适用于下一代列控系统的列车自主完整性检查方法研究[J].铁道通信信号工程技术,2019,16(11):10-12+21.
CUI Junfeng. Research on method of autonomous train integrity detection for next generation train control system[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2019, 16(11): 10-12+21(in Chinese).
- [7] EVANS J, ORMESHER-HUSSEIN C, MINUZZI J, et al. Enhancing railway signalling systems based on train satellite positioning, on-board safe train integrity, formal methods approach and standard interfaces, enhancing traffic management system functions[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 38: 335-342.
- [8] 杨美皓,潘佩芬,刘国梁,等.北斗铁路车载时空基准设备标准化应用研究[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心.第十二届中国卫星导航年会论文集——S10 PNT 体系与多源融合导航, 2021: 28-34.
YANG Meihao, PAN Peifen, LIU Guoliang, et al. Research on standardized application of BeiDou railway train-mounted spatio-temporal datum equipment[C]// The 12th China Satellite Navigation Conference, CSNC 2021-S10 PNT System and Multi-sensor Fusion Navigation Technology, 2021: 28-34 (in Chinese).
- [9] 范楷,张森,滕达,等.基于北斗卫星的列车完整性检查技术方案[J].铁道通信信号工程技术,2022,19(6):23-27.
FAN Kai, ZHANG Miao, TENG Da, et al. Research on technical scheme of train integrity inspection based on Beidou satellite[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2022, 19(6):23-27(in Chinese).
- [10] SUZUKI T, KUBO N. GNSS positioning with multipath simulation using 3D surface model in urban canyon[C] //Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). 2012: 438-447.
- [11] SPIRENT. Realistic multipath and obscuration simulation—simulating the impact of the local environment on GNSS signals[R]. 2019; MCD00396 Issue; 1-03.
- [12] 安毅,蔡伯根,宁滨,等.基于GPS和虚拟卫星的列车完整性检查方法研究[J].铁道学报,2012,34(9):40-44.
AN Yi, CAI Baigen, NING Bin, et al. Research on train integrity monitoring method based on GPS and virtual-satellite[J]. Journal of the China railway society, 2012, 34(9):40-44(in Chinese).
- [13] 杨安.基于卫星导航的列车完整性检查仿真方法研究[D].北京:北京交通大学,2021.
YANG An. Research on GNSS-based train integrity inspection simulation method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021(in Chinese).
- [14] ZHANG T, CAI B, LU D, et al. Train localization environmental scenario identification using features extracted from historical data[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings, 2021:12-21.
- [15] NELSON W. Use of circular error probability in target detection[R]. Bedford, MA: MITRE Corporation, 1988.

(编辑:孟彬)