

基于机车环境的实时动态定位测试与分析

张 虎, 肖立志

(湖南中车时代通信信号有限公司, 湖南 长沙 410005)

摘 要: 近年来, 随着全球导航卫星系统 (GNSS) 定位技术的广泛应用, 在铁路行业列车定位技术由传统的粗略定位逐步向高精度实时动态 (RTK) 定位发展。传统的 GNSS 产品在进行 RTK 定位时, 存在固定解比例低、固定解不稳定且不支持长基线距离等缺陷, 造成机车控制成功率低。为此, 文章提出了针对机车环境进行 GNSS 产品定制优化设计、提高 RTK 固定解比例和稳定性、增加基线距离到 100 km 的观点, 并制定了一套测试和分析方案, 实际测试检验了优化效果。自 2019 年以来, 通过本文测试筛选的 GNSS 产品被成功应用于 LKJ-15C 系统, 并在数十台电力机车上完成了稳定可靠的运行, 实现了机车智能驾驶、开车自动对标、自动调车防护等高精度定位应用。

关键词: 全球导航卫星系统; 实时动态定位; 固定解; 长基线

中图分类号: U285.24

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)02-0100-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.02.017

Real-time Kinematic Positioning Test and Analysis Based on Railway Scene

ZHANG Hu, XIAO Lizhi

(Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Changsha, Hunan 410005, China)

Abstract: In recent years, with the wide application of global navigation satellite system (GNSS) positioning technology, train positioning technology in railway industry has gradually developed from traditional rough positioning to high-precision real-time dynamic (RTK) positioning. Traditional GNSS products have some defects in RTK positioning, such as low proportion of fixed solution, unstable fixed solution and lack of long baseline distance supporting, which could lead to low success rate of locomotive control. This paper puts forward a viewpoint of customized optimization design for GNSS products according to the locomotive environment, improving the proportion and stability of RTK fixed solution, increasing the baseline distance to 100 km, and formulates a set of test and analysis scheme. Practical tests verified the optimization effect. Since 2019, the GNSS products tested and screened by the scheme in this paper have been successfully applied to LKJ-15C system, and have completed stable and reliable operation on dozens of electric locomotives, realizing high precision positioning applications such as intelligent driving, automatic benchmarking and automatic shunting protection.

Keywords: global navigation satellite system(GNSS); real-time kinematic(RTK) positioning; fixed solution; long baseline

0 引言

实时动态 (real-time kinematic, RTK) 定位技术基于载波相位观测值, 能够实时提供观测点的三维定位结果, 其固定解精度可以达到厘米级。传统的导航、测绘等行业, 为了追求绝对的高精度定位, 对卫星仰

角、信噪比、基站距离和差分数据延迟等参数都有着严格的要求; 而过于严苛的条件要求, 使得一般的全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 产品在不良环境条件下, 如部分环境被遮挡、基站距离较远或通信网络质量差, RTK 定位结果的可用性大大降低。因此, 在机车需要 RTK 精确定位的时候, 现有的 GNSS 产品极有可能无法提供预期的 RTK 定位坐标。

RTK 的工作模式有电台模式和网络模式两种。

收稿日期: 2020-09-28

作者简介: 张虎 (1986—), 男, 工程师, 主要研究方向为通信产品开发 and 设计, 卫星导航定位系统的测试、开发与应用。

电台 RTK 工作模式覆盖半径一般为 10 km 左右；网络 RTK 工作模式覆盖半径理论上可以无限远，但实际上，距离基站 30 km 后，GNSS 终端若要获取稳定的 RTK 固定解，通常会变得非常困难。考虑到机车的运行轨迹呈线状分布，网络 RTK 工作模式相对更适用于铁路行业，同时车载设备需要配备一款支持长基线的 GNSS 定位产品。

选择一款适合于机车控制的 GNSS 产品，其既能快速稳定地获得 RTK 固定解，随时满足高精度应用需要；又能支持较远的基线距离，在距离基站 100 km 甚至更远地方还能保持稳定的 RTK 固定解定位，并且能够保证定位精度可靠，这是机车高精度定位应用需要解决的问题。为此，需根据机车环境对 GNSS 产品进行定制并优化，同时对优化改进后的 GNSS 产品开展测试和分析，以检验优化效果。

1 RTK 定位测试方案

为了更好地检验 GNSS 产品 RTK 定位的各项指标，需要进行以下测试准备：

(1) 选择测试线路。为了更好地检验 GNSS 产品反复进入 RTK 定位的性能以及长基线效果，选择一条沿线隧道较多的铁路线路，最远测试地点距离基站至少 100 km。

(2) 选择高可靠的测试基准。优选一款全系统、全频点并具有三轴光纤陀螺、三轴微机电系统且支持紧耦合技术的组合导航系统。

(3) 选择试验机车。试验机车需配备多系统、多频点、高精度 GNSS 天线且方便测试接线。本文选择“和谐”号电力机车，其运行速度一般不超过 160 km/h。

1.1 测试系统原理

测试系统主要由差分基准站、移动站、差分服务器及通信网络组成，系统原理如图 1 所示。差分基准站^[1-2]连续跟踪观测 BDS, GPS, GLONASS 及 Galileo 等导航卫星信号，实时计算差分修正数据并通过有线网络或移动通信网络发送给差分服务器。移动站通过移动通信网络实时向差分服务器上位置信息，并获取差分修正数据进行内部解算，实现差分定位计算。差分服务器负责数据的收集、分发与记录等。

1.2 测试与记录

借用机车原有的 GNSS 天馈线系统，采用功分器将卫星信号平均分配给基准 GNSS 和 3 个被测 GNSS 产品，测试方案如图 2 所示。其中 3 个被测 GNSS

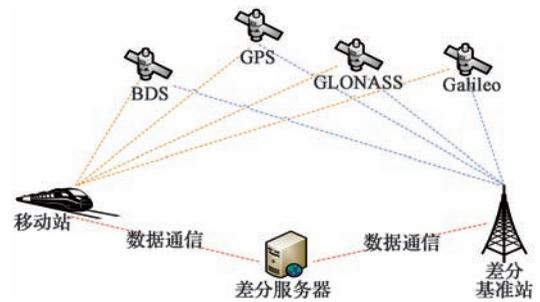


图 1 GNSS 定位测试系统原理

Fig. 1 Principle of GNSS positioning test system

产品为不同厂家、不同型号的根据机车环境进行定制优化设计后的 GNSS 产品，定制优化设计主要包括：

(1) 优化差分延迟时间，确保差分数据中断 60 s 时仍有 RTK 固定解；

(2) 优化 RTK 固定解收敛条件，确保快速稳定地获得 RTK 固定解，并且支持 100 km 长基线^[3-5]。

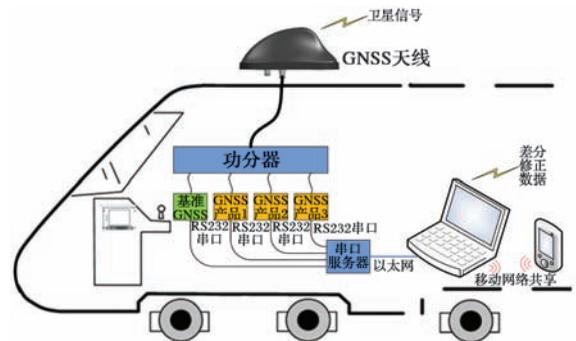


图 2 测试方案

Fig. 2 Test plan

基准 GNSS 和 3 个 GNSS 产品通过 RS232 串口连接到串口服务器；串口服务器将多路串口合并为一路线路以太网接口，并在 PC 端虚拟出 4 个 RS232 端口。笔记本电脑通过手机共享移动网络实现联网，被连接到差分服务器上，接入测试的差分基准站；再将卫星差分修正数据通过串口发送至基准 GNSS 和 3 个 GNSS 产品，同时记录基准 GNSS 和 3 个 GNSS 产品输出的 WGS-84 坐标系下参考美国国家海洋电子协会 (national marine electronics association, NMEA) 标准格式的多系统联合定位的 GGA 与 RMC 数据，数据刷新率为 5 Hz。必要时，记录原始观测数据，用于对异常定位结果的进一步分析。

2 测试数据分析

试验结束后，对测试记录数据进行统计分析，重点分析基站 100 km 内 RTK 固定解比例、固定解稳定性以及固定解偏差这 3 项指标。

2.1 RTK 固定解比例

分析多个 GNSS 产品的测试数据，截取相同的开

始时间和结束时间,去除长时间静止状态下的机车定位数据,统计RTK固定解的数据量及测试期间理论应有的定位数据量,两者比值即为RTK固定解比例。

机车控制采用高精度的RTK固定解定位数据,而非单点定位、RTD和RTK浮点解数据(由于其精度无法保障),因此RTK固定解比例成为一项关键指标。在相同的测试条件下,RTK固定解比例越高,GNSS产品则越容易实现和维持RTK固定解,即可用性越好。

RTK固定解比例由测试线路和环境决定,可以通过多个测试结果相互对比进行综合判断。在距离基站100 km范围内,RTK固定解比例应不低于80%。实际测试的RTK固定解比例数据如表1所示。

表1 RTK固定解比例对比
Tab. 1 RTK fixed solution proportion

项目	基准	GNSS	GNSS	GNSS
	GNSS	产品1	产品2	产品3
固定解比例/%	92.21	41.21	89.45	86.27

统计结果显示,基准GNSS、GNSS产品2和GNSS产品3的RTK固定解比例均高于80%,满足使用要求;而GNSS产品1的固定解比例严重偏低,不能满足使用需求。

2.2 RTK固定解稳定性

在正常情况下(无遮挡、通信网络运行正常),能够稳定保持RTK固定解即称之为稳定性好;反之,RTK固定解与其他定位方式反复切换,或长时间处于非RTK固定解即称之为不稳定。

RTK固定解越稳定,反映出RTK初始化时间^[6]、重新恢复RTK定位的时间等指标越好。稳定的RTK固定解为机车控制提供充分的保障,不会因在机车需要进行控制的地点是非RTK固定解而造成控制失败。RTK固定解的稳定性受多方面因素影响:

(1) 遮挡环境。在此环境下,GNSS系统退出RTK固定解,表现为卫星数突然减少、精度因子增大。

(2) 通信质量差。移动通信网络中断,与差分服务器失联,GNSS系统退出RTK固定解,表现为差分延迟增大。

(3) 与基站距离太远。进入RTK固定解的时间较长,需要同时对比基线距离。

将测试数据导入EXCEL表格,选择定位方式、差分延迟、卫星数及基站距离等数据列,插入折线图,显示数据变化趋势。统计RTK固定解定位方式跳变为其他定位方式的次数以及非RTK固定解的累计时间。跳变次数越少、非RTK固定解时间越短,表明RTK固定解越稳定。

实际测试的一段数据分析如图3和图4所示。图3中,定位方式0表示定位无效,1表示单点定位,2表示RTD伪距差分,4表示RTK固定解,5表示RTK浮点解。一般的导航测绘行业应用时,RTK固定解被要求差分延迟在20 s至30 s以内;铁路行业应用时,差分延迟可以放宽到60 s以上,以保证在通信网络不良情况下拥有更稳定的RTK固定解。图4中,卫星数突然减少,表明有遮挡环境。实际测试时,若运行到距离基站100 km位置,则手动切换到其他基站。由图可以看出,基准GNSS的固定解非常稳定,实际统计全程固定解有22次跳变,基本发生在卫星数突然降低时,即在遮挡环境下。在经历遮挡环境后能够立即重新进入到RTK固定解,实际统计全程非RTK固定解时间为958.2 s。途中切换基站时,有一小段RTK浮点解,实际持续时间为119 s,因机车距离基站较远,获得RTK固定解时间较长,因此这属于正常现象。

在相同的测试条件下,数据分析情况如图5和图6所示。可以看出,GNSS产品1的表现明显较差:经历遮挡后不能快速地恢复RTK固定解;在卫星数稳定、差分延迟正常的情况下,不能稳定在RTK固定解;距离基站稍远时(约50 km),长时间处于RTK浮点解不能固定的状态。实际统计的全程固定解跳变只有13次,但是非RTK固定解时间达到了12 689.4 s。

GNSS产品2和GNSS产品3的数据分析方法与

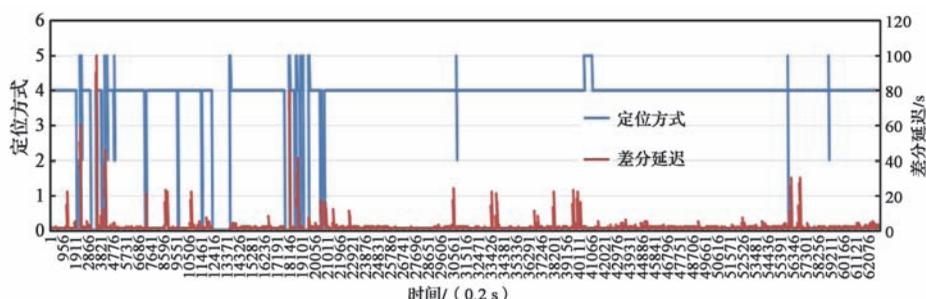


图3 基准GNSS定位方式与差分延迟折线图

Fig. 3 Reference GNSS positioning mode and differential delay curve

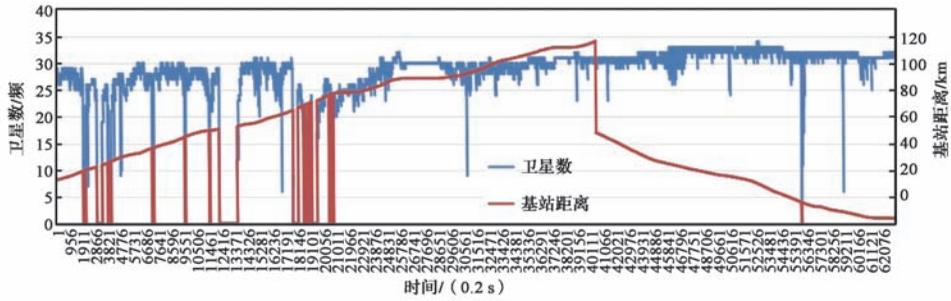


图4 基准GNSS卫星数与基站距离折线图

Fig. 4 Reference GNSS satellite number and base-station distance curve

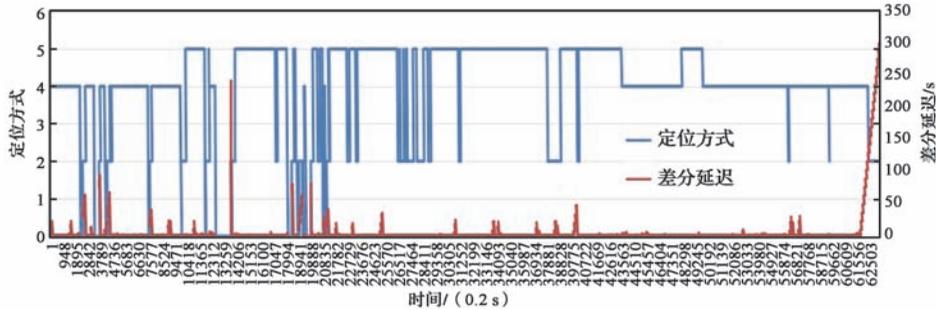


图5 GNSS产品1的定位方式与差分延迟折线图

Fig. 5 Positioning mode and differential delay curves of GNSS product 1

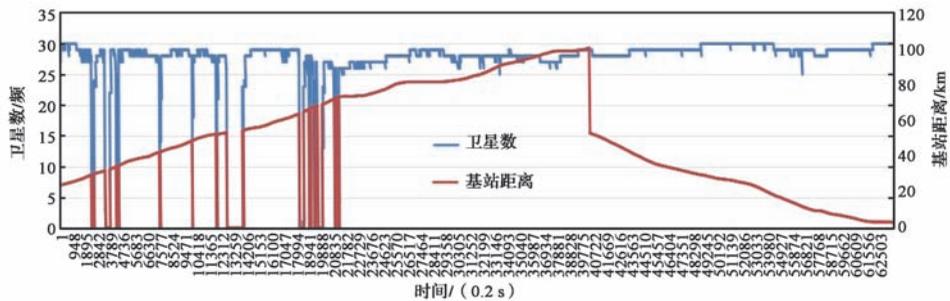


图6 GNSS产品1的卫星数与基站距离折线图

Fig. 6 Satellite number and base-station distance curves of GNSS product 1

上述分析方法相同，数据分析结果对比如表2所示。

表2 RTK测试结果对比
Tab. 2 Comparison of RTK test results

项目	基准 GNSS	GNSS 产品1	GNSS 产品2	GNSS 产品3
RTK定位跳变/次	22	13	19	28
非RTK固定解时间/s	958.2	12 689.4	1 340.4	1 758.6
无效数据比例/%	5.77	4.75	5.43	4.51
平均卫星数量/颗	29.5	28.3	29.9	31.5
平均HDOP	0.53	0.74	0.53	0.57

通过分析可以发现，GNSS产品2与GNSS产品3的RTK固定解比例接近(表1)，但是GNSS产品2的RTK定位跳变次数及非RTK固定解时间参数则更优，表明其RTK固定解更稳定。卫星数越多，表明搜索卫星能力越好。水平精度因子(horizontal dilution of precision, HDOP)为纬度和经度等误差平

方的开根号值，该数值越低，表明遮挡或干扰越少，定位相对越准确。这两项参数作为参考技术指标，分析固定解偏差时需要进行对比。

2.3 RTK固定解偏差

RTK固定解定位用于机车控制，若偏差过大，则可能造成机车控制失常(如自动开车对标时定位到其他轨道，与发车参数不符，将造成自动开车对标失败)，甚至引发危险的事故(如本务机车调车防护作业时冒进撞车)^[7]。因此，必须保证RTK固定解的精度非常可靠。由于机车应用的特殊性，虽不要求定位精度全部达到厘米级，但至少要保证99.99%的定位精度在±0.5 m范围内。

定位精度指空间实体位置信息(通常为坐标)与其真实位置之间的接近程度。真实位置虽无法被准确测量，但实际测量时以高精度设备作为测试基准，

分析 GNSS 产品与基准 GNSS 的定位偏差并将其等效为 GNSS 产品的定位精度。

将两组数据导入 EXCEL，并按世界标准时间 (universal time coordinated, UTC) 刻度逐一对齐，对比同一时刻 GNSS 产品与基准 GNSS 之间的定位距离，即为固定解偏差。选择偏差数据列，插入折线图，显示偏差的变化趋势，再进一步分析找出偏差超过 0.5 m 的数据。

实际测试的一段数据中，GNSS 产品 1 的 RTK 固定解稳定性较差，占有比例太少，因此不再进一步分析其偏差。GNSS 产品 2、GNSS 产品 3 与基准 GNSS 的 RTK 固定解偏差情况对比如图 7 所示。可以看出，与基准 GNSS 相比，绝大部分固定解的偏差为厘米级 (不超过 10 cm)。

GNSS 产品 2 与基准 GNSS 的固定解偏差超过 0.5 m 的点有 6 个，占比 0.01%；GNSS 产品 3 与基准 GNSS 的固定解偏差超过 0.5 m 的点只有 1 个，占比 0.002%。采用 VARP 函数计算固定解偏差的方差，GNSS 产品 2 数据的方差为 3.89，GNSS 产品 3 数据的方差为 3.12，表明 GNSS 产品 3 的偏差相对集中，精度稳定性优于 GNSS 产品 2 的。筛选 RTK 固定解偏差超过 0.5 m 的点 (表 3)。表 3 中，UTC 格式为 hhmmss.s，如 232620.0 表示 23 h 26 min 20.0 s。通过对比可以发现，当定位偏差较大时，卫星数或 HDOP 与表 2 所列的平均值相比，卫星数明显减少，HDOP 明显升高。为进一步确认引起偏差过大的原因，可以将定位数据生成 kml 格式文件，在 Google Earth 软件中根据运行轨迹趋势作出判断。以 UTC 时刻 232620.0 定位数据为例，GNSS 产品 2 与基准 GNSS 偏差 126.8 cm，GNSS 产品 3 与基准 GNSS 偏差 56.0 cm，在 Google Earth 中显示的运行轨迹如图 8

表 3 RTK 固定解偏差超过 0.5 m 的点
Tab. 3 Data of RTK fixed solution deviation more than 0.5 m

UTC 时刻	基准 GNSS		GNSS 产品 2		GNSS 产品 3		
	卫星 / 颗	HDOP	偏差 / cm	卫星 / 颗	HDOP	偏差 / cm	卫星 / 颗
232620.0	30	1.25	126.8	15	1.3	56.0	14
234753.0	30	1.21	63.7	20	1.1	4.9	20
235028.0	32	0.8	114.0	17	1.2	2.0	19
235028.2	31	0.86	105.8	5	6.2	—	—
235057.0	31	1.11	58.6	15	1.3	—	—
3023.2	31	1.06	65.7	18	1.7	18.4	13

所示。可以看出，蓝色 (基准 GNSS) 与绿色 (GNSS 产品 1) 的轨迹间隔均匀，无明显偏差；红色 (GNSS 产品 2) 与橙色 (GNSS 产品 3) 运行轨迹明显偏离轨道。



图 8 在 Google Earth 中对定位偏差
Fig. 8 Comparing positioning errors in Google Earth

造成同一地点出现定位偏差大的原因是机车将进入隧道，部分环境受到遮挡，此时卫星数减少或精度因子明显升高。因此，在实际产品应用中，可以结合卫星数和精度因子等指标，以进一步提高定位数据的可靠性。

2.4 结论

通过对比测试，固定解比例和固定解稳定性表现最好的是 GNSS 产品 2，其次是 GNSS 产品 3，固定解比例分别达到了 89.45% 和 86.27%；固定解定位精度表现最好的是 GNSS 产品 3，其次是 GNSS 产品 2，偏差在 ±0.5 m 范围内的比例分别达到了 99.998% 和 99.99%。两款产品在经历遮挡后都能够快速地恢复

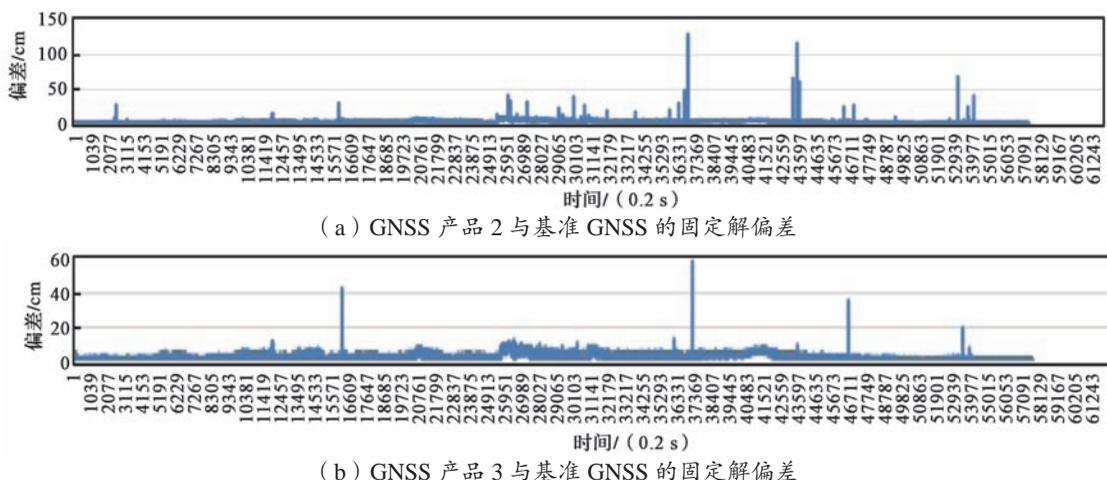


图 7 RTK 固定解偏差

Fig. 7 RTK fixed solution deviation

RTK 固定解，支持 100 km 长基线，且 RTK 固定解定位精度可靠。

3 应用效果

通过测试、筛选的 GNSS 定位产品，自 2019 年底开始分别被用于国家能源集团神朔铁路、朔黄铁路以及南昌铁路局、青藏公司等路局数十台“和谐”电力机车上，且已连续安全运行超过 16 个月。

在国家能源集团神朔铁路，集成高精度 RTK 定位的 LKJ-15C 列车运行控制系统被应用于智能驾驶系统，为自动唤醒、自动整备、自动出段、自动联挂、自动发车、自动过分相、自动运行、自动停车、自动入段、自动调车及自动休眠等列车控制全过程提供精确的列车位置信息^[8-9]，实现了万吨重载列车运营的全过程自动驾驶。

在国家能源集团朔黄铁路，通过采用高精度 RTK 定位技术实现了重载列车站内自动开车对标^[10](图 9)，定位精度约为 ± 5 cm，控制精度约为 ± 50 cm。由于取消了人工对标，大幅降低了司乘人员的操纵难度。



图 9 自动对标应用

Fig. 9 Application of automatic marking

在南昌铁路局、青藏公司等地，通过采用高精度 RTK 定位技术，实现了调车智能安全防护(涉及站界、车挡、接触网终点等关键位置)(图 10)以及调车信号机安全防护和区间作业的安全防护。



图 10 调车防护应用

Fig. 10 Application of shunting protection

4 结语

通过在铁路应用场景下的测试与分析，我们筛选出支持 100 km 长基线且固定解比例、稳定性、精度均较优的 GNSS 产品，并将其应用在机车智能化控制中，发挥着至关重要的作用。

然而在实际运用过程中，单纯的 GNSS 产品尚存在一些不足，如在进入隧道、检修库或遮挡严重的车站时不能提供连续的精确位置信息；并且现有的 GNSS 应用还未达到 SIL 安全等级要求。未来，我们将研究具有安全等级的 RTK 定位产品，同时开发集成惯性导航的高精度组合导航产品。

参考文献：

[1] 邓辉飞. 基于北斗卫星的铁路地基增强系统应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(6): 27-41.
DENG Y F. Application Research of Railway GBAS Based on Beidou Satellite[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(6): 27-41.

[2] 宋胜登, 李宇, 于旭阳, 等. 徐盐铁路 NRTK 定位精度研究与应用分析[J]. 地理空间信息, 2020, 18(3): 97-99.
SONG S D, LI Y X, YU X Y, et al. Research and Application of NRTK Positioning Accuracy in Xuyan Railway[J]. Geospatial Information, 2020, 18(3): 97-99.

[3] 盛传贞, 高彦丽, 贾丹, 等. 一种新的中长基线 GPS RTK 解算方法[J]. 中国科技论文, 2017, 12(5): 589-595.
SHENG C Z, GAO Y L, JIA D, et al. A new method for medium-range baseline GPS RTK positioning[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(5): 589-595.

[4] 于文浩, 张云, 韩彦岭, 等. 北斗三频中长基线差分定位性能研究[J]. 全球定位系统, 2018, 43(4): 102-109.
YU W H, ZHANG Y, HAN Y L, et al. Middle-Long-Range Differential Positioning Using Triple-Frequency BeiDou Satellite System[J]. GNSS World of China, 2018, 43(4): 102-109.

[5] 陈伟. 长距离 RTK 动态测量滑坡监测精度分析[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 29-33.
CHEN W. Precision Analysis of Landslide Monitoring with Long Distance RTK Dynamic Measurement[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(4): 29-33.

[6] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗/全球卫星导航系统(GNSS)测量型 OEM 板性能要求及测试方法: BD 420002-2015[S]. 北京: 全国北斗卫星导航标准化技术委员会, 2015.

[7] 冯振兴. 本务机车调车作业安全辅助防护系统方案研究[J]. 中国铁路, 2019(5): 73-80.
FENG Z X. Scheme Study of Safety Assistant System for Shunting Operation of Leading Locomotive[J]. China Railway, 2019(5): 73-80.

[8] 湖南中车时代通信信号有限公司. 一种机车智能驾驶精准定位的方法及系统: CN 201910750114.0[P]. 2019-11-12. <http://pss-system.cnipa.gov.cn/sipopublicsearch/portal/uiIndex.shtml>.

[9] 湖南中车时代通信信号有限公司. 一种用于列车运行控制的卫星差分定位系统及方法: CN 202010857015.5[P]. 2020-10-02. <http://pss-system.cnipa.gov.cn/sipopublicsearch/portal/uiIndex.shtml>.

[10] 株洲南车时代电气股份有限公司. 辅助铁路机车对标的的方法及辅助装置: CN 201510508187.0[P]. 2017-07-21. <http://pss-system.cnipa.gov.cn/sipopublicsearch/portal/uiIndex.shtml>.