



文档信息	Description
测试型号	HI32R7-MI0-000
测试日期	2025.10.15
版本	V1.0
文档属性	公开

### 1 概述

HI32 组合导航系统集成了高性能惯性测量单元(IMU)和功能强大的双天线、全频段、全频点 RTK GNSS 接收机,凭借领先的算法和集成方面的专长。我们将 IMU 和 GNSS 数据融合,即使在 GNSS 信号失锁的环境中仍能为您的应用提供准确、实时的位置、速度、姿态、授时等信息,通过本报告我们将分场景与友商进行比测,测试结果表明 HI32 是一款可靠的组合导航系统,可以满足船舶、汽车、机器人等载体的导航应用。

### 2 产品特性

- 高性能 MEMS-IMU
- 陀螺仪零偏不稳定性高达  $1.6^\circ/\text{h}$
- 加速度计零偏不稳定性高达  $18\mu\text{g}$
- 双天线定向  $0.2^\circ$  1m 基线
- 授时精度 20ns
- RTK 定位精度 1cm
- 速度精度 0.03m/s
- 全星座、全频点 RTK-GNSS 系统,双天线测向

### 3 典型应用

- 无人机
- 无人船
- 动中通
- 无人机
- 农业/工程机械
- 机器人

### 4 测试场景

HI32 的性能与实际应用场景有很大关系,因此我们选取了以下几种典型的场景进行测试:

- 开阔环境
- 城市峡谷
- 林荫道路
- 地下停车场
- 隧道测试
- 高架辅路

### 5 测试设备

#### 5.1 被测主机

HI32R7 是一款高精度的双天线 RTK 组合导航产品,其具体参数如下:

### 5.1.1 GNSS 参数

Table 1: HI32 内置 GNSS 板卡参数

Parameters	Description	Note	
通道	1408 通道		
星座	BDS/GPS/GLONASS/Galileo/QZSS BDS B1I/B2I/B3I GPS L1 C/A/L2P(Y)/L2C/L5 Galileo E1/E5a/E5b GLONASS L1/L2 QZSS L1/L2/L5		
冷启动	<30s		
热启动	<5s	1	
定位精度	单点(RMS) DGPS(RMS) RTK(RMS)	水平:1.5m 高程:2.5m 水平:0.4m+1ppm 高程:0.8m+1ppm 水平:0.8cm+1ppm 高程:1.5cm+1ppm	2,3
定向精度(RMS)	0.1°/1m 基线		
授时精度(RMS)	20ns		
速度精度(RMS)	0.03m/s	4	
数据更新率	20Hz		
最大速度	500m/s		
最大高度	50000m		

### 5.1.2 IMU 参数

Table 2: HI32 内置 IMU 参数

参数	陀螺仪	加速度计	Note
量程	2000°/s	12g	
零偏不稳定性	1.6°/h	18ug	
零偏重复性	8°/h	0.15mg	
随机游走	0.25°/√h	0.04 m/s/h	

### 5.1.3 电气与机械参数

Table 3: HI32 电气与机械参数

参数	描述
尺寸	75x70.5x25.2mm
重量	180g
电压	9-36V
功耗	<1.5W
温度	-40-85°C

## 5.2 参考主机

### 5.2.1 主机简介

本次测试采用 Hexagon | NovAtel PwrPak7D-E1 高精度 GNSS/INS 组合导航系统作为真值参考设备。PwrPak7D-E1 集成了世界领先的 SPAN GNSS+INS 技术，通过 Waypoint Inertial Explorer 后处理软件进行双向平滑解算，可获得厘米级定位精度和高精度姿态信息，是理想的测试基准设备。



Figure 1: PwrPak7D-E1 外观图

### 5.2.2 后处理

通过 Waypoint Inertial Explorer 后处理软件，结合高精度基准站数据，对 PwrPak7D-E1 采集的原始 GNSS 和 IMU 数据进行前向-后向平滑（Forward-Backward Smoothing）处理，可获得以下最优性能指标：

Table 4: PwrPak7D-E1 后处理指标

工作模式	水平位置 cm	垂直位置 cm	水平速度 (cm/s)	垂直速度 (cm/s)	横滚/俯仰 (°)	航向 (°)
RTK 后处理	1.0	2.0	2.0	1.0	0.009	0.042
双天线 RTK	1.0	2.0	2.0	1.0	0.009	0.035

### 5.2.3 性能说明

- RTK 后处理：使用基准站数据进行后处理 RTK 解算，结合 SPAN 紧耦合，获得最高精度
- 双天线 RTK：使用双天线配置，航向精度进一步提升至 0.035°
- 所有精度值为 RMS (均方根) 误差
- 后处理采用前向-后向双向平滑算法，显著优于实时解算性能

### 5.2.4 PwrPak7D-E1 失锁的后处理性能：

在 GNSS 信号完全失锁情况下，通过后处理双向平滑技术，PwrPak7D-E1 可保持以下精度水平：

Table 5: PwrPak7D-E1 失锁的后处理性能

失锁时长	水平位置 cm	垂直位置 cm	水平速度 (cm/s)	垂直速度 (cm/s)	横滚/俯仰 (°)	航向 (°)
0s	1.0	2.0	2.0	1.0	0.009	0.042
10s	2.0	2.0	2.0	1.0	0.009	0.035
60s	35	10	3.0	1.1	0.014	0.048

**Note1:** 后处理双向平滑技术利用失锁前后的 GNSS 数据对失锁期间的轨迹进行约束，因此失锁期间的精度显著优于实时解算。60 秒失锁后水平位置精度仍可保持在 35cm 以内。

### 5.3 真值轨迹生成

为确保测试基准的高精度和可靠性，本次测试采用 NovAtel Waypoint Inertial Explorer 专业后处理软件对 PwrPak7D-E1 采集的原始 GNSS 观测数据和 IMU 数据进行处理，生成厘米级精度的真值轨迹。

经过后处理的真值轨迹精度：

Table 6: PwrPak7D-E1 真值轨迹精度(后处理)

参数	开阔环境	城市环境	失锁 60s 内
水平位置 (cm)	1.0	2.0	35
垂直位置 (cm)	2.0	3.0	10
航向 (°)	0.035	0.042	0.048

**Note1:** 以上精度为 RMS 值。真值轨迹的精度远高于被测设备的实时输出精度，可作为可靠的测试基准。

### 5.4 GNSS 天线

AT360 是一款四星全频测量天线，该天线支持北斗、GPS、GLONASS 和 GALILEO 主流导航系统卫星信号的接收，并兼容 L-Band。具有高增益、小型化、高灵敏度、多系统兼容及高可靠性等特点，可有效满足用户的使用需求。广泛应用于测量测绘、智能交通、智慧农业和安全监测等高精度场合。

## 6 评价指标

本测试采用以下指标评估系统性能：

- RMS (均方根误差): 水平位置误差、合速度误差、方位角误差的均方根值
- CEP95: 95% 的定位结果误差小于该门限值
- 可用性: 满足精度要求 (水平<0.3m, 垂直<1.4m, 方向<1.5°) 的数据比例

## 7 测试方法

- 安装设备：将被测设备和 PwrPak7D-E1 同时安装在测试车辆上。被测主机接入 RTK 与里程计
- 设备同步：确保两套设备时间同步（通过 PPS 或 GNSS 时间），并且使用相同的 GNSS 天线。
- 数据采集：在各测试场景下同步采集数据
- 后处理：使用 Inertial Explorer 对 PwrPak7D-E1 数据进行后处理，生成真值
- 数据对齐：将被测设备输出与真值轨迹进行时间对齐
- 误差计算：计算位置、速度、姿态误差
- 统计分析：计算 RMS、CEP95 等统计指标
- 结果输出：生成测试报告和图表

## 8 测试结果

### 8.1 开阔环境

#### 8.1.1 环境概述

本次测试在开阔的城市道路环境下进行，测试路段选择了市郊主干道，周围无高层建筑遮挡，天空视野开阔，卫星可见数充足，GNSS信号质量良好。测试车辆以 20-60 km/h 的速度行驶，测试时长约 6 分钟，行驶里程约 2.5 公里。测试过程中包含了直线行驶、转弯、加减速等多种运动状态，能够充分验证 GNSS/SINS 组合导航系统在理想条件下的定位精度和稳定性测试环境。



Figure2: 开阔环境运行轨迹图

### 8.1.2 数据曲线

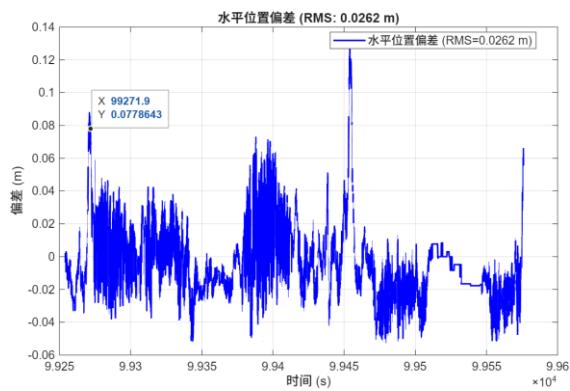


Figure3: 水平位置偏差

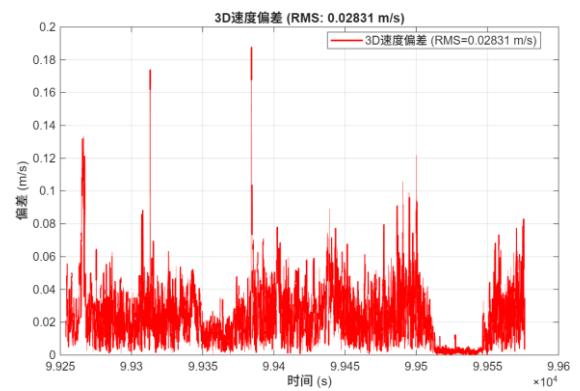


Figure4: 3D 速度偏差

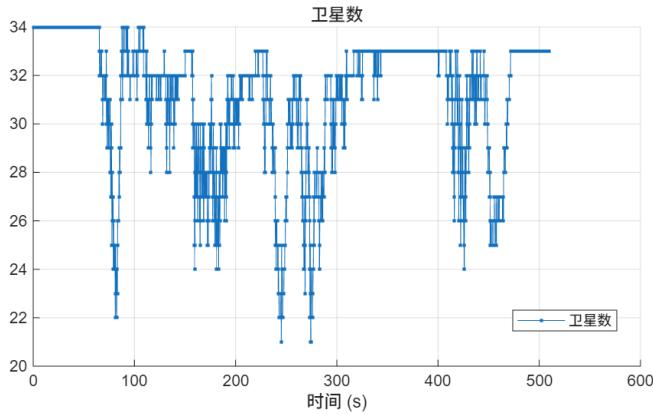


Figure5: 卫星数

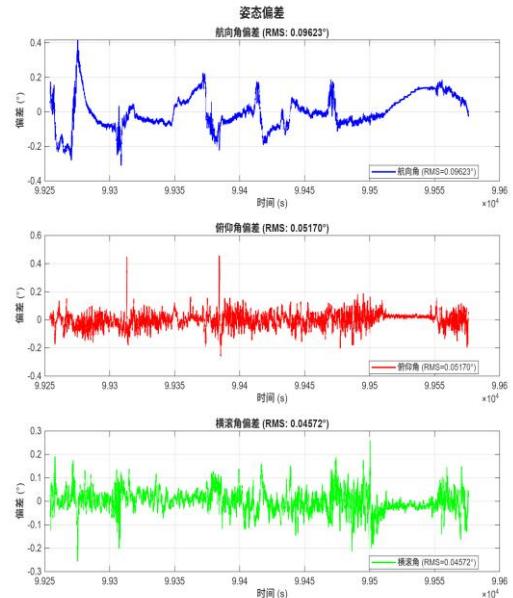


Figure6: 姿态偏差

### 8.1.3 精度分析

Table 7: HI32 开阔环境下精度分析

型号	可用性(%)	CEP95(m)	水平位置 RMS(m)	合速度 RMS(m/s)	方位角 RMS(°)
HI32R7-MI0-000	100	0.04645	0.0262	0.0283	0.0962

### 8.1.4 测试结果

HI32 在开阔路段表现卓越，CEP95 仅 4.64cm（远优于 SAE 标准 29cm 的 6.2 倍），水平 RMS 2.62cm、速度 RMS 2.83cm/s、方位角 RMS 0.10°，100% 可用性，达到厘米级定位精度。

## 8.2 城市峡谷测试

### 8.2.1 环境概述

本次测试在城市峡谷环境中进行，测试时长为 7 分钟。城市峡谷是指高楼林立的城市街道区域，两侧建筑物密集且高度远超街道宽度，形成类似峡谷的狭窄空间。在此环境下，GNSS 卫星信号会受到建筑物的严重遮挡，产生多径效应和信号衰减，导致可见卫星数量减少、定位精度下降。测试重点关注设备在复杂城市环境下的卫星信号接收能力、定位精度表现、信号切换恢复能力以及多径干扰抑制效果，以评估其在实际城市应用场景中的性能稳定性。



Figure7: 城市峡谷环境与轨迹

### 8.2.2 数据曲线

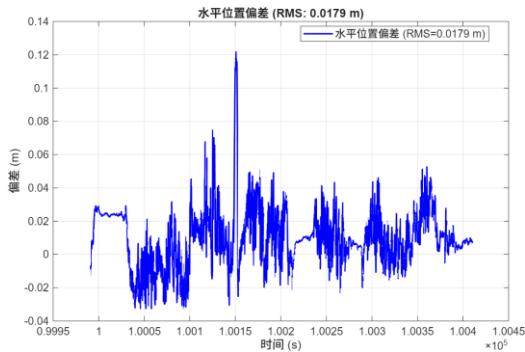


Figure8: 水平位置偏差

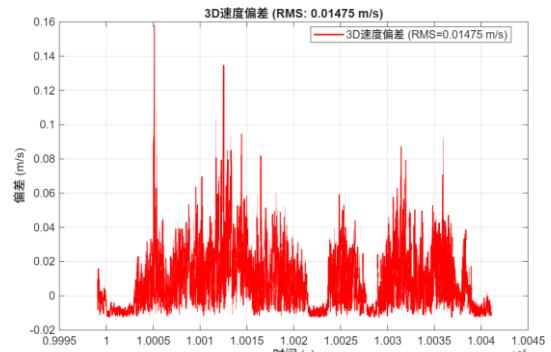


Figure9: 3D 速度偏差

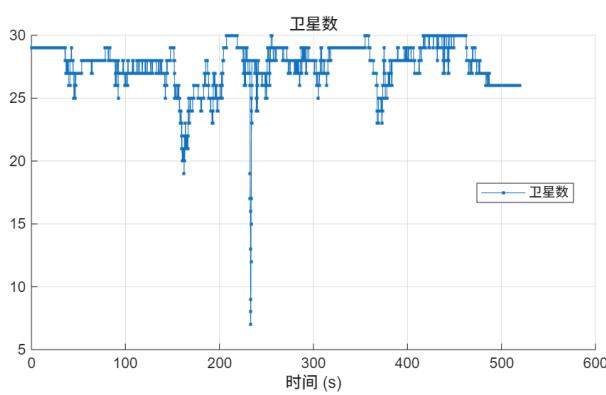


Figure10: 卫星数

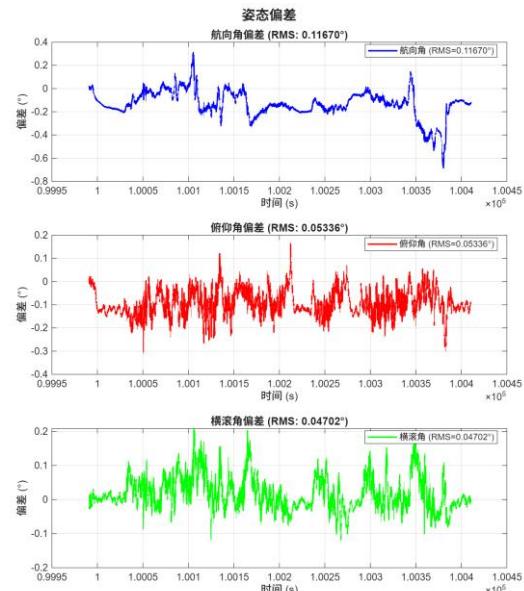


Figure11: 姿态偏差

### 8.2.3 精度分析

Table 8: HI32 城市峡谷环境下精度分析

型号	可用性(%)	CEP95(m)	水平位置 RMS(m)	合速度 RMS(m/s)	方位角 RMS(°)
HI32R7-MI0-000	100.00	0.03474	0.01787	0.01475	0.11670

### 8.2.4 测试结果

HI32 在城市峡谷路段表现卓越，CEP95 仅 3.47cm（远优于 SAE 标准 29cm 的 8.4 倍），水平 RMS 1.79cm、速度 RMS 1.48cm/s、航向角 RMS 0.12°，100% 可用性，达到厘米级定位精度。

## 8.3 林荫道路测试

### 8.3.1 环境概述

本次测试在城市林荫道路环境下进行，道路两侧树木茂密，对 GNSS 卫星信号形成显著遮挡，模拟了典型的城市道路信号受限场景。测试时长约 6 分钟，行驶距离约 2.5 公里，车辆经历了多次加速、减速、转弯等动态机动，以及短暂静止状态。



Figure12: 林荫道路环境与轨迹

### 8.3.2 数据曲线

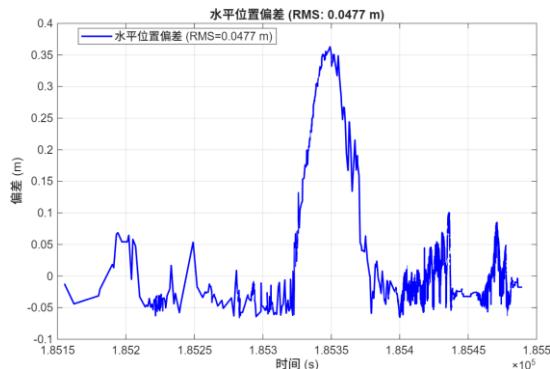


Figure13: 水平位置偏差

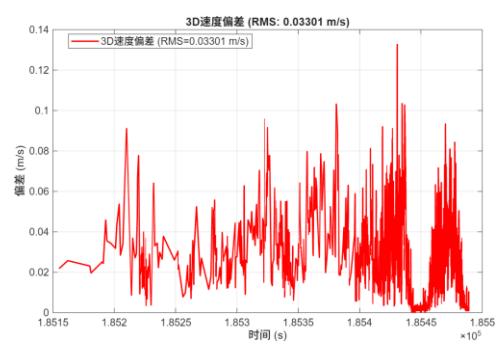


Figure14: 3D 速度偏差

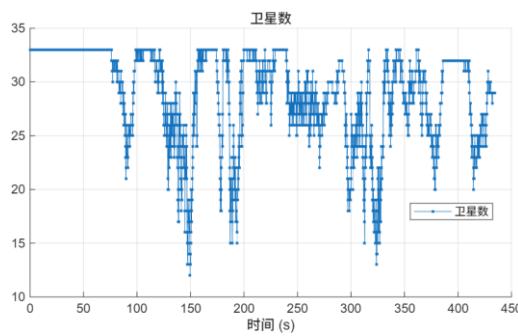


Figure15: 卫星数

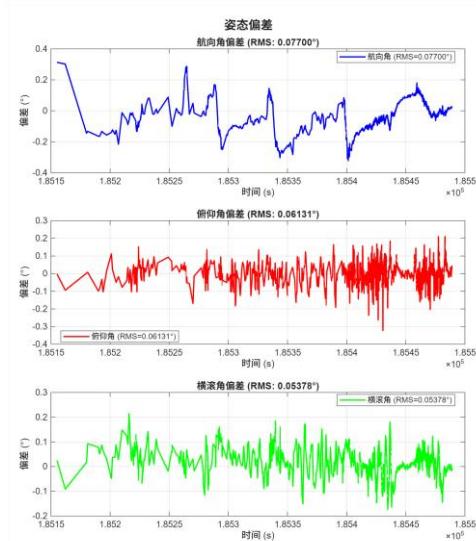


Figure16: 姿态偏差

### 8.3.3 精度分析

Table 9: HI32 林荫道路环境下精度分析

型号	可用性(%)	CEP95(m)	水平位置 RMS(m)	合速度 RMS(m/s)	方位角 RMS(°)
HI32R7-MI0-000	98.80	0.06993	0.0477	0.033	0.077

### 8.3.4 测试结果

HI32 在林荫道路测试中表现优异，CEP95 仅 6.99cm，水平 RMS 4.77cm、速度 RMS 3.3cm/s、方位角 RMS 0.077°，98.80% 可用性，在 GNSS 信号遮挡环境下仍保持厘米级定位精度

### 8.4 地下车库测试

#### 8.4.1 环境概述

本次测试在地下停车场环境中进行，模拟 GNSS 完全失锁的极端场景。测试过程中，车辆在地下停车场内行驶约 900 秒，期间 GNSS 信号持续失锁达 300 秒。测试旨在评估 HI32 组合导航系统在 GNSS 拒止环境下，仅依靠 IMU 定位定姿能力，以及系统在自动驾驶应用场景下的可用性表现。

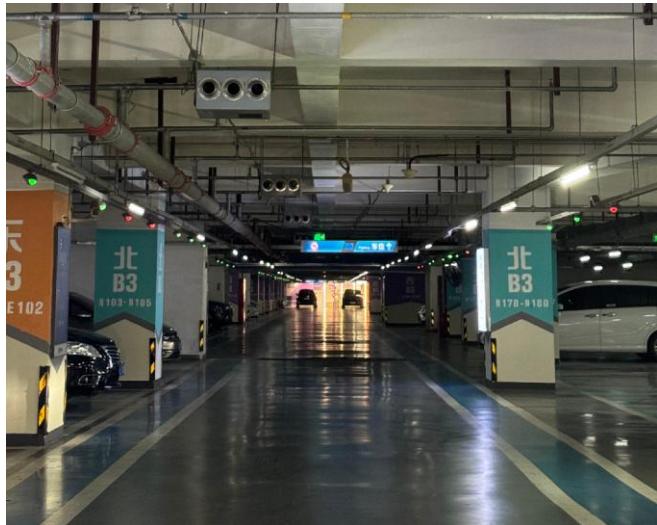


Figure17: 车库环境与轨迹

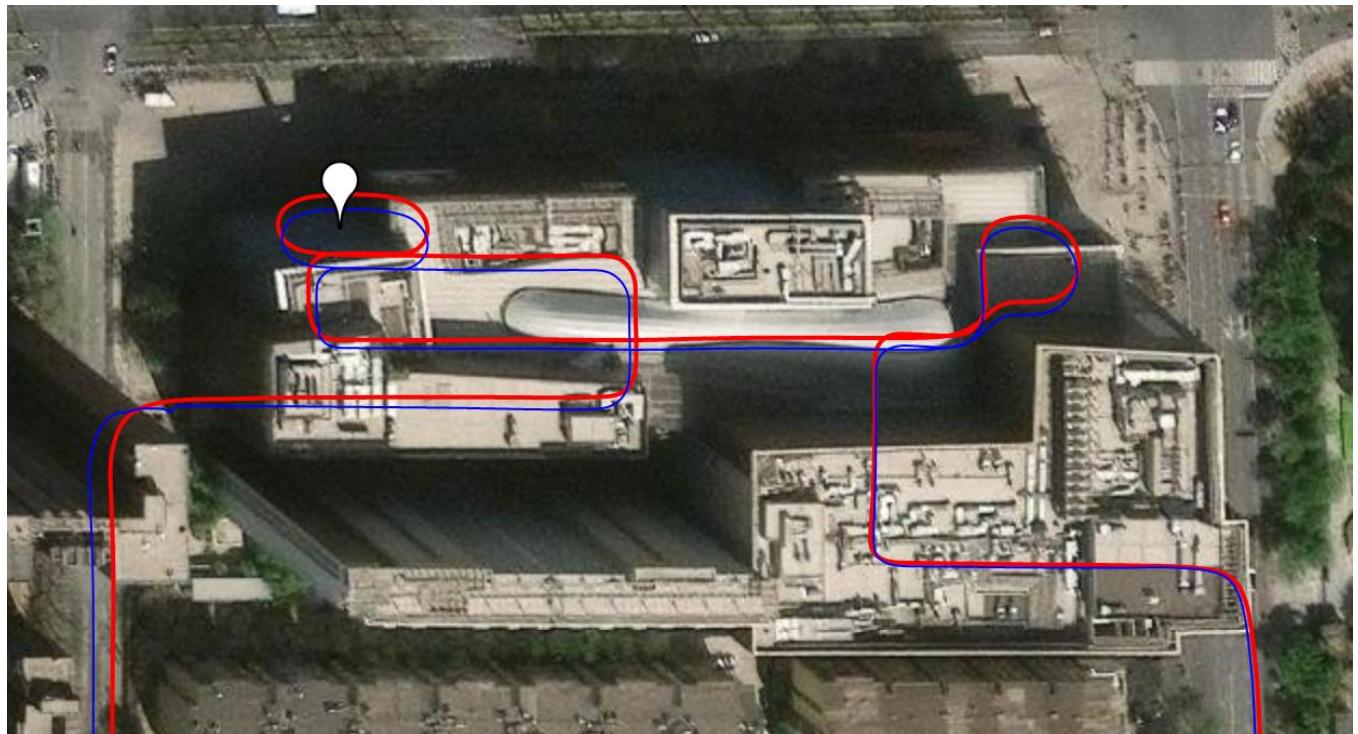


Figure18: 轨迹局部放大图

## 8.4.2 数据曲线

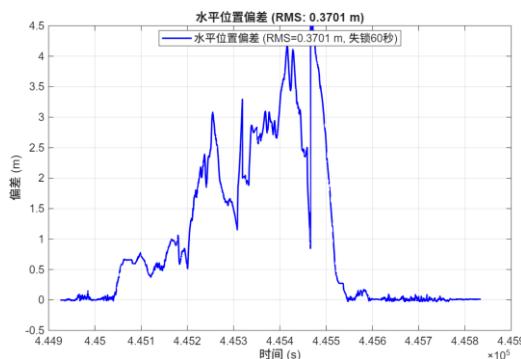


Figure 19: 水平位置偏差

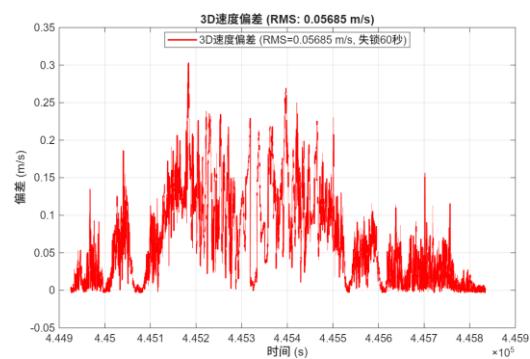
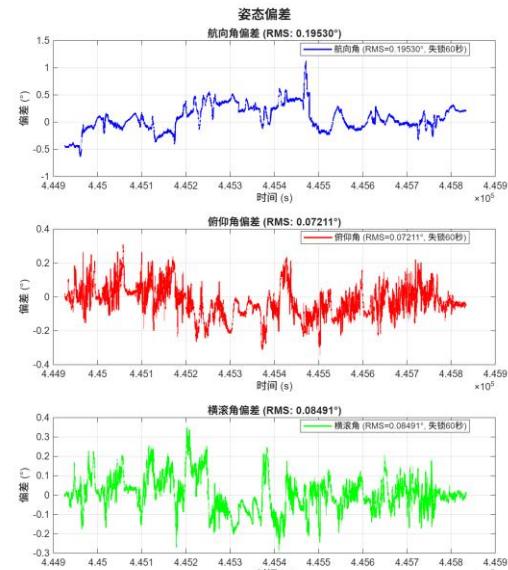
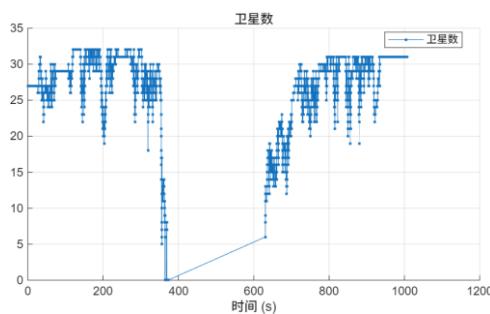


Figure 20: 3D 速度偏差



## 8.4.3 精度分析

Table 10: HI32 地下车库环境下精度分析

型号	可用性(%)	CEP95(m)	水平位置 RMS(m)	合速度 RMS(m/s)	方位角 RMS(°)
HI32R7-MI0-000	45.95	3.54068	0.37009	0.05685	0.1953

## 8.4.4 测试结果

HI32 在地下车库 GNSS 失锁环境测试中，面对 60 秒完全失锁的极端条件，水平定位 RMS 达到 0.37m，CEP95 为 3.54m，3D 速度 RMS 为 5.7cm/s，航向角 RMS 为 0.195°，俯仰角 RMS 为 0.072°，横滚角 RMS 为 0.085°，系统可用性达到 45.95%，展现了在 GNSS 拒止环境下的鲁棒性。

## 8.5 隧道环境测试

### 8.5.1 环境描述

本测试旨在评估 HI32 组合导航系统在卫星信号遮蔽环境下的自主定位性能。车辆以 60-70km/h 的速度驶入长约 3003m 的隧道，通过时间约 3 分钟。在隧道内 GNSS 信号完全失锁，系统切换至纯惯性导航模式进行航位推算。测试重点考察惯导系统在长时间失锁状态下的位置漂移特性、速度和姿态解算精度，验证系统在信号拒止场景下的可靠性。



Figure23: 隧道环境与轨迹

### 8.5.2 数据曲线

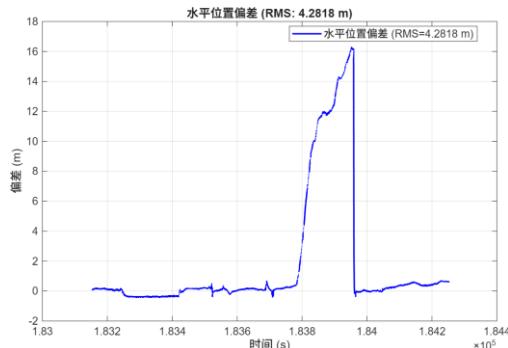


Figure24: 水平位置偏差

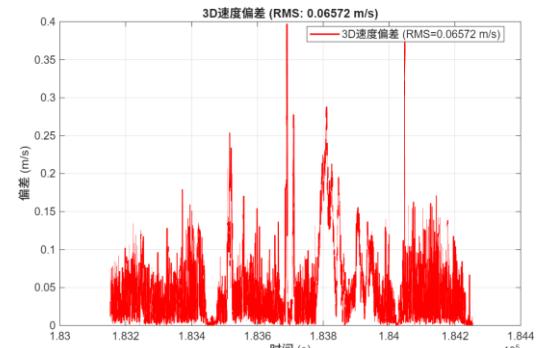


Figure25: 3D 速度偏差

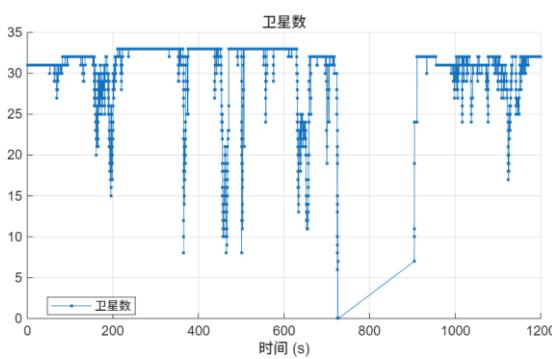


Figure26: 卫星数

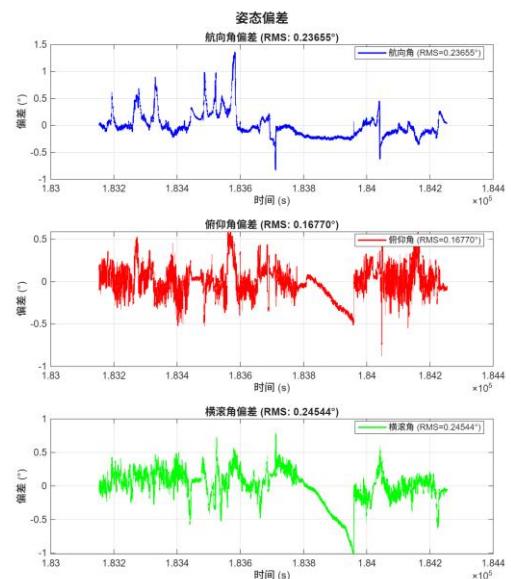


Figure27: 姿态偏差

### 8.5.3 精度分析

Table 11: HI32 隧道环境下精度分析

型号	可用性(%)	CEP95(m)	水平位置 RMS(m)	合速度 RMS(m/s)	方位角 RMS(°)
HI32R7-MI0-000	79.8	11.44122	4.28184	0.06572	0.23655

### 8.5.4 测试结果

HI32 在隧道 GNSS 失锁环境测试中，车辆以 60-70km/h 速度通过长约 3003m 的隧道，面对约 3 分钟完全失锁的极端条件，水平定位 RMS 达到 4.28m，CEP95 为 11.44m，3D 速度 RMS 为 6.57cm/s，航向角 RMS 为 0.237°，俯仰角 RMS 为 0.168°，横滚角 RMS 为 0.245°，展现了在高速长距离 GNSS 拒止环境下的惯性导航性能

## 8.6 高架辅路测试

### 8.6.1 环境概述

本测试旨在评估 HI32 组合导航系统在卫星信号半遮蔽环境下的自主定位性能。车辆以 60-70km/h 的速度行驶，测试重点考察惯导系统在长时间半遮蔽环境下的位置漂移特性、速度和姿态解算精度，验证系统在信号的可靠性。



Figure28: 高架辅路环境与轨迹

### 8.6.2 数据曲线

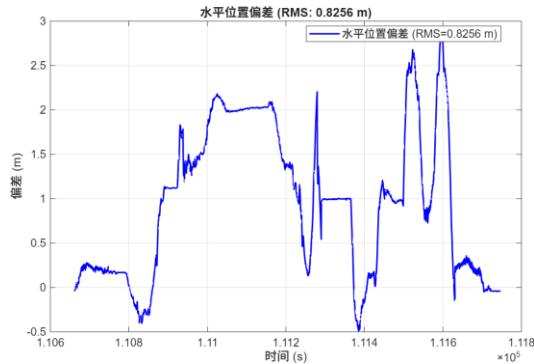


Figure29: 水平位置偏差

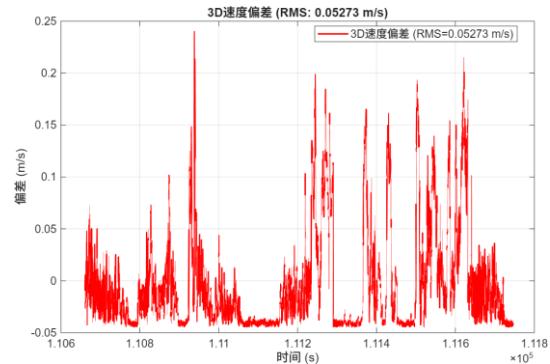


Figure30: 3D 速度偏差

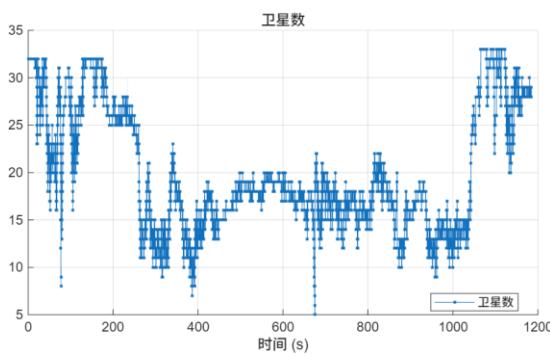


Figure31: 卫星数

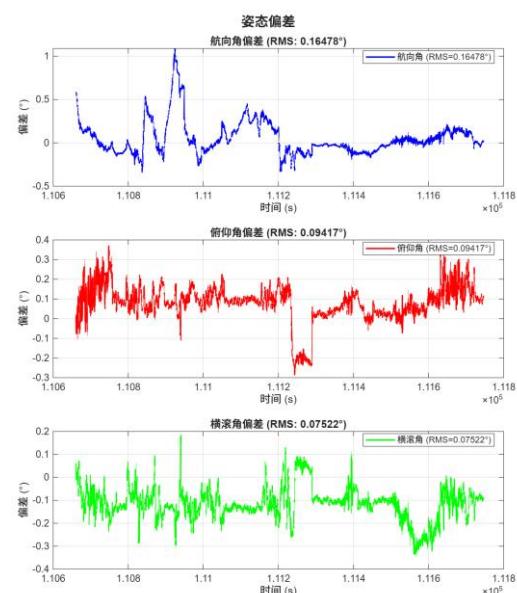


Figure32: 姿态偏差

### 8.6.3 精度分析

Table 12: HI32 高架辅路环境下精度分析

型号	可用性(%)	CEP95(m)	水平位置 RMS(m)	合速度 RMS(m/s)	方位角 RMS(°)
HI32R7-MI0-000	24.85413	2.39546	0.82559	0.05273	0.16478

### 8.6.4 测试结果

HI32 在高架辅道 GNSS 信号遮蔽环境测试中，面对频繁的卫星信号中断与恢复切换条件，水平定位 RMS 达到 0.83m，CEP95 为 2.40m，3D 速度 RMS 为 5.27cm/s，航向角 RMS 为 0.165°，系统可用性达到 24.85%，展现了在城市复杂高架环境下组合导航系统的快速收敛能力和定位精度保持性能。

### 9 结论

本次测试在 6 种典型场景下对 HI32 GNSS/INS 组合导航系统进行了全面评估，结果表明：

#### 9.1 优异场景表现：

开阔环境：CEP95 达 4.6cm，水平 RMS 2.6cm，100%可用性，展现厘米级定位能力

城市峡谷：CEP95 仅 3.5cm，水平 RMS 1.8cm，100%可用性，多径抑制效果显著

林荫道路：CEP95 为 7.0cm，98.8%可用性，信号遮挡下仍保持高精度

#### 9.2 挑战场景表现：

地下车库：60 秒 GNSS 失锁后水平 RMS 0.37m，CEP95 3.54m，可用性 45.95%

隧道环境：3 分钟失锁、3003m 行驶距离下，水平 RMS 4.28m，速度 RMS 6.6cm/s，可用性 79.8%

高架辅道：频繁信号切换下水平 RMS 0.83m，CEP95 2.40m，可用性 24.85%

#### 9.3 核心优势：

GNSS 信号良好时达到厘米级定位精度。

长时间失锁环境下惯导漂移控制良好，速度和姿态精度稳定。

信号恢复后快速收敛，组合导航切换平滑。

## 10 附录

### 10.1 测试条件

#### 测试基本条件

测试地点	北京昌平
测试日期	2025.10
天气条件	晴
温度范围	20-30°C
基准站位置	北京昌平
基准站设备	HI600
基准站距离	<=20km
数据链类型	网络
真值机型号	NovAtel PwrPak7D-E1 (后处理)

### 10.2 参考文献

NovAtel PwrPak7D-E1 Product Sheet, Hexagon | NovAtel, 2023

NovAtel SPAN Technology for GNSS+INS, Hexagon | NovAtel

Waypoint Inertial Explorer User Guide, Hexagon | NovAtel

SPAN on OEM7 Installation and Operation User Manual, Hexagon | NovAtel

相关行业技术标准和测试方法

## 11 联系我们

Email: [sales@hipnuc.com](mailto:sales@hipnuc.com)

Website: [HiPNUC - IMU AHRS GNSS | 姿态感知 | 定位导航 | 状态监测 | 3D 动作感测](#)

Phone: +86 010 6972 6346, 15801501203

Add: 北京市昌平区超前路 21 号中咨合创产业园