

山区峡谷大跨悬索桥主缆架设GNSS基线解算及模糊度分析

刘 豪¹, 马宗源^{2*}, 潘 玥³, 杨鸿波⁴

¹贵州桥梁建设集团有限责任公司, 贵州 贵阳

²贵州交通职业大学路桥工程学院, 贵州 贵阳

³同济大学土木工程学院, 上海

⁴贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年8月30日; 录用日期: 2025年9月20日; 发布日期: 2025年10月9日

摘 要

本文针对山区悬索桥主缆架设过程中测量精度不足、效率低、实时性差等关键问题, 基于北斗卫星导航系统的高精度定位技术, 研究了多基站联合RTK解算、模糊度固定优化及网平差算法, 提出一种模型与数据相结合的部分模糊度固定策略和评估方法。进一步将该方法应用于贵州山区某在建峡谷大跨径悬索桥的主缆架设施工定位测量及调索工作当中, 实现了毫米级实时动态监测与智能化主缆架设, 显著提升了施工精度和效率。本研究为山区复杂环境下长大桥梁建设工程提供国产化自主可控的技术解决方案。

关键词

山区悬索桥, 主缆架设, 北斗卫星导航系统, 基线解算, 模糊度固定

GNSS Baseline Solution and Ambiguity Analysis for Main Cable Traction of Long-Span Suspension Bridges in Mountainous Canyons

Hao Liu¹, Zongyuan Ma^{2*}, Yue Pan³, Hongbo Yang⁴

¹Guizhou Bridge Construction Group Co., Ltd., Guiyang Guizhou

²School of Road and Bridge Engineering, Guizhou Communications Polytechnic University, Guiyang Guizhou

³College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

⁴Guizhou Transportation Planning Survey & Design Academe Co., Ltd., Guiyang Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 刘豪, 马宗源, 潘玥, 杨鸿波. 山区峡谷大跨悬索桥主缆架设 GNSS 基线解算及模糊度分析[J]. 图像与信号处理, 2025, 14(4): 457-466. DOI: 10.12677/jisp.2025.144042

Abstract

The key issues, such as insufficient measurement accuracy, low efficiency, and poor real-time performance during the main cable traction process of suspension bridges in mountainous areas are studied in this paper. The multi-base station joint RTK solution, ambiguity fixation optimization, and network adjustment algorithm, and proposes a partial ambiguity fixation strategy and evaluation method (combining model and data) is analyzed via the Beidou Global Navigation Satellite System (GNSS). This method was applied to the positioning measurement and cable adjustment work of the main cable traction construction of a canyon bridge under construction in the mountainous area of Guizhou Province. It achieved millimeter-level real-time dynamic monitoring and intelligent main cable traction, significantly improving the construction accuracy and efficiency, and providing a domestic, independent and controllable technical solution for the construction of long bridges in complex mountainous environments.

Keywords

Mountain Suspension Bridge, Main Cable Traction, Beidou GNSS, Baseline Solution, Fixed Degree of Ambiguity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

虽然中国在基础设施建设方面取得了举世瞩目的成就，但是在山区大跨径悬索桥施工领域仍然存在施工技术落后、智能化水平低等问题[1]。悬索桥主缆架设是悬索桥施工的关键环节，直接关系到桥梁的整体稳定性和使用寿命。传统的悬索桥主缆架设技术主要依赖人工测量和经验判断，存在测量精度不足、数据实时性差及调索效率低等问题，难以满足山区复杂施工环境下的高精度要求[2]。随着北斗卫星导航系统的全球服务能力和定位精度不断提升，基于北斗卫星的高精度定位技术为悬索桥主缆的智能化架设施工提供了新的解决方案[3]。

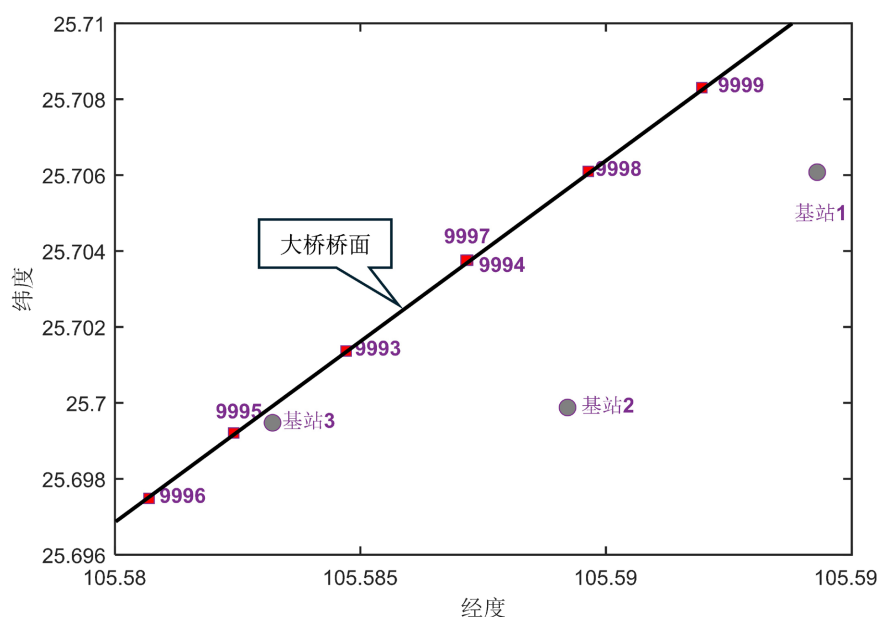
全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是能在地球表面或近地空间的任何地点提供全天候的三维坐标、速度及时间等信息的空基无线电导航定位系统，目前全球广泛应用的卫星导航系统主要有：中国北斗(BDS)、美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 及欧盟 Galileo [4]。自 2020 年中国的北斗卫星导航系统正式提供亚全球服务，已经有四十多颗北斗卫星在轨运行，拥有超过 2.3 万个站点，提供米级至毫米级实时定位服务，广泛应用于测绘、智能农业、车辆导航等领域，此外北斗卫星定位测量技术也已经被广泛用于高边坡、滑坡、水坝及桥梁等大型结构物的形变监测，精度可达到毫米级[5]。使用 GNSS 进行大型结构物形变监测过程中，由于地表植被等遮挡测站会减少可见卫星数目，从而降低监测结果精度和可靠性。中国的北斗卫星导航系统由于特有的区域加全球星座设计，在中国大部分区域其卫星可见数一般都大于国外 GNSS 系统，能够明显改善部分区域因卫星数少或空间构型差等原因导致的不能定位或定位精度差问题。一般采用实时载波相位差分(Real Time Kinematic, RTK)技术开展实时动态监测。RTK 技术同时采用测站间与卫星间的观测值差分策略消除时空相关误差以实现高精度的定位，通常用于局部

范围内的灾害体实时高精度变形监测,其中应用较广的区域短距离 RTK 定位精度可达毫米级[6] [7]。近些年来随着多频多系统的发展,多频多系统观测值逐步应用于变形监测中。叶世榕等人提出了一种基于北斗三频观测值的可靠变形监测数据 RTK 处理方法,结果表明短基线条件下三频 RTK 算法模糊度固定成功率较双频模式有了较大提高;且在不能固定原始频点模糊度时,经过恒星日滤波后宽巷固定解平面方向的误差也可达到毫米级[8]。此外,近期研究显示多 RTK 基站也会显著降低定位数据解算及模糊度固定过程中的信噪比[9] [10]。

本文针对悬索桥主缆架设过程中监测精度不足、效率低下、实时性差等关键技术难题,将北斗卫星实时定位技术及多基站联合解算和模糊度优化算法应用于贵州山区某在建峡谷大桥的主缆架设施工定位测量及调索工作当中,实现了毫米级实时动态监测与智能化主缆架设,可实现主缆架设过程中的毫米级高精度定位,显著提升了施工精度和效率。本文的研究成果可广泛应用于大跨度悬索桥、斜拉桥等复杂结构的施工监测,为类似工程提供技术参考和示范。本文通过智能化建造技术,减少人工干预,降低施工中的监测成本,同时提高施工质量,具有显著的经济和社会效益[11]。

2. 主缆架设的北斗测量系统

本文研究的应用对象为贵州省黔西南布依族苗族自治州花江大峡谷某悬索桥建设工程;大桥全长 2890 米,主桥为 1420 米跨径的单跨钢桁梁悬索桥,桥面距水面垂直高度 625 米。共布设了三台 RTK 基准站(下文简称基准站),七台定位测量用的用户站(下文简称用户站);图 1 为北斗卫星定位基站和用户站的平面分布及设备的现场照片。其中三台基准站采用华测 B5 接收机,分别建在大桥两岸基岩和峡谷底部村庄的房顶上,相比用户站可以认为其为静态站。另外 7 台用户站采用华测 H7 接收机,该接收机为一体化集成供电式北斗卫星定位监测站,可置于桥墩上,或与主缆索线绑定,用于监测其形变或位置变化。本文在监测站和形变监测站回传的北斗卫星定位原始观测数据基础上,采用多基站联合 RTK 解算的方式以及“数据采集→实时基线解算→多基站融合→施工应用”的技术路线开展山区峡谷悬索桥主缆架设的高精度(毫米级)GNSS 定位测量工作。



(a) 平面分布图



Figure 1. Planar distribution of base stations and user stations and on-site photos (rectangular points represent user stations, and circular points represent monitoring stations)
图 1. 基站和用户站的平面分布与现场照片(矩形点为用户站, 圆形点为监测站)

1) 数据采集

通过布设多台高精度北斗卫星定位基准站, 部署在大桥附近基岩或屋顶等稳定位置, 提供实时差分基站改正数据。采用 RTCM 3.3 标准格式传输观测数据, 支持 GPS/BDS/GLONASS 多系统融合。同时在悬索桥主缆架设关键点(如锚碇、基准索、索鞍等)安装北斗卫星定位移动监测站, 实时回传定位数据。通过 NTRIP 协议实现数据无线传输, 确保施工环境下的实时性。

2) RTK 基线解算

基于回传的基站和移动监测站北斗卫星定位观测数据, 采用双差载波相位观测值, 构建卡尔曼滤波模型, 实时解算基线向量。采用改进的部分模糊度固定策略, 动态筛选高可靠性卫星, 提升复杂环境下的固定成功率。在此基础上, 采用最优整数估计, 结合模糊度成功率指标, 对浮点解进行加权优化, 降低基线错误固定风险。

3) 多基站融合

对多基站基线结果进行统一平差, 利用最小二乘法消除单基站误差, 提高定位稳健性。通过验后方差检验剔除粗差, 确保解算精度。

4) 施工应用

根据北斗卫星定位基线平差结果进行主缆线形拟合, 并与设计线形对比, 进而动态调整主缆架设位置。同时实时显示主缆三维坐标、偏差预警及调整建议, 实现施工过程的数字化管理。

RTK 基线解算模块基于北斗卫星定位伪距和相位双差观测值, 建立 RTK 定位函数模型。采用高度角定权方式建立函数模型。针对多系统观测量过多影响解算效率, 复杂环境下观测数据质量降低等问题, 采用部分模糊度固定策略。针对浮点解精度降低的问题, 采用最优整数解模糊度估计方法[12]。

3. 基线解算及模糊度固定

1) 模糊度固定效果比较

基于北斗卫星定位数据滤波预处理结果, 可进行相位模糊度固定。采用不同的模糊度固定方法对数据进行分析。以 2024 年 8 月 3 日 9994 号用户站(位于大桥跨中主缆位置处)的数据为例, 图 2 为采用传统模型驱动和数据驱动的模糊度固定和本文的模糊度固定优化方法的基线解算结果。可以看到, 本文提出的方法的模糊度固定率为 96.86%, 而传统方法的模型驱动模糊度固定率为 56.57%, 数据驱

动的模糊度固定率仅为 11.14%，且其计算时间也是三种方法中最长的(86 秒，另外两种方法计算时间分别为 53 秒和 18 秒)。说明本文提出的改进方法在某些数据场景下，其模糊度固定率和计算效率优势十分明显。可以看到，本文提出的方法的模糊度固定率为 100%，而传统方法的模型驱动模糊度固定率为 98.89%，数据驱动的模糊度固定率虽然也为 100%，但其计算时间为 248 秒，而本文的方法的计算时间仅为 23 秒。说明本文提出的方法相比传统的模型驱动，其模糊度固定率更高；相比数据驱动，其计算效率更高。

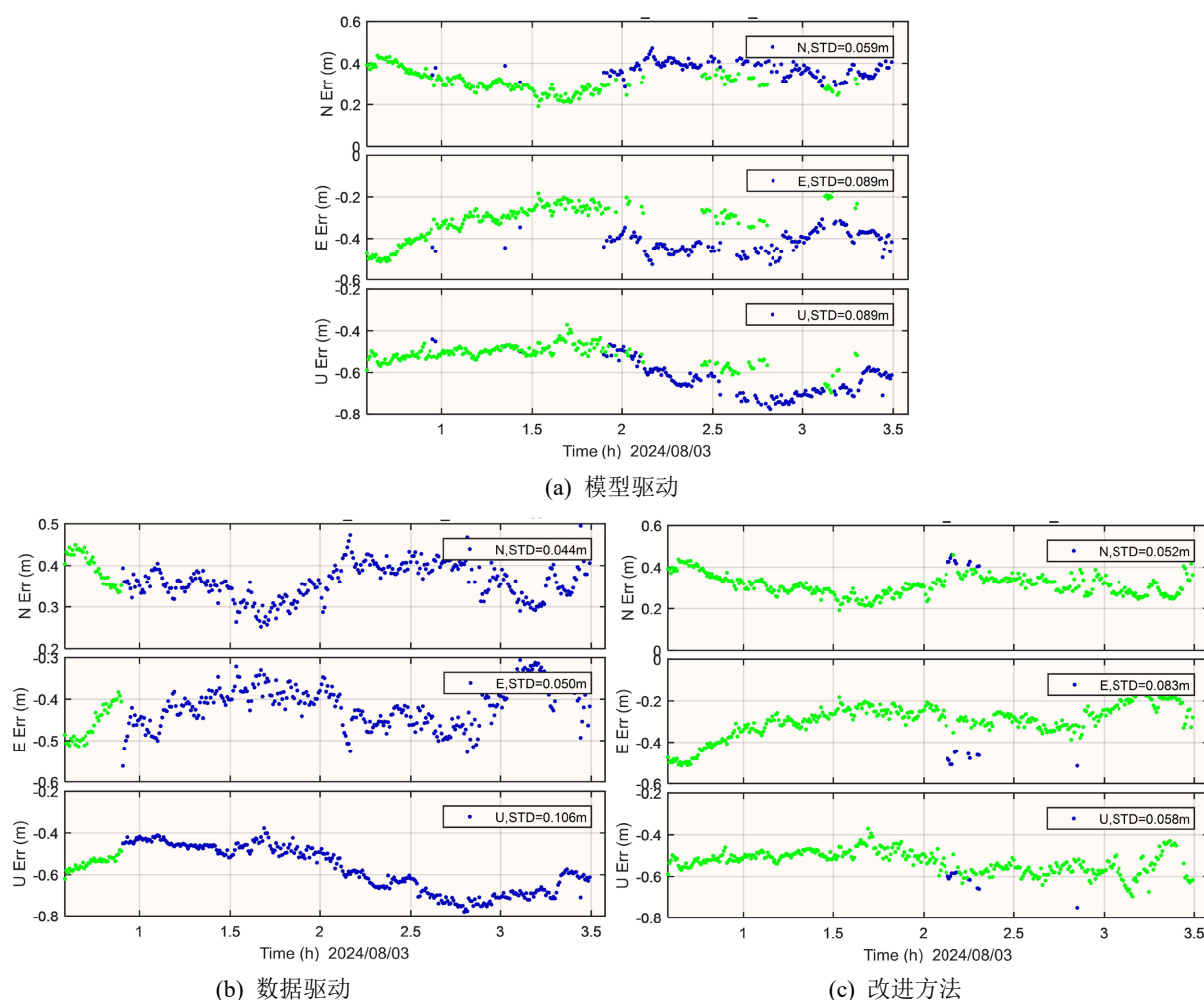


Figure 2. Comparison of coordinate data of the model, data and the improved driving ambiguity fixation method

图 2. 模型、数据及改进的驱动模糊度固定方法的坐标数据比较

2) 解算精度验证

为了验证本文所采用的算法在基准索实时定位技术中的效果，将本文的算法与常规的 RTK 基线解算 (RTKLIB 软件解算) 结果进行比较。采用 9990 和 9991 两个基准站同时进行基线解算开展精度评估。由于这两个基准站位置可以认为固定不动，因此可以采用静态基线解算结果作为参考值。在基线解算时，两个软件的配置参数保持一致。基线解算关键配置如下，系统和频点：GPS(L1/L2)+BDS(B1/B3)，卫星星历：广播星历，截止高度角：10°，采样率：30 秒，模糊度固定策略：部分模糊度固定，模糊度估计：连续估计，电离层、对流层改正：双差消除。图 3 为 2024 年 7 月 10 日、2024 年 8 月 15 日、2024 年 9 月

14 日不同三天的基线动态解算结果。从三个图中可以看到, 采用本文的基线解算算法, 可以在水平方向的误差保持在毫米级, 在高程方向上也能达到 1 cm 左右, 其基线解算精度和稳定性都远高于 RTKLIB 软件解算的结果。

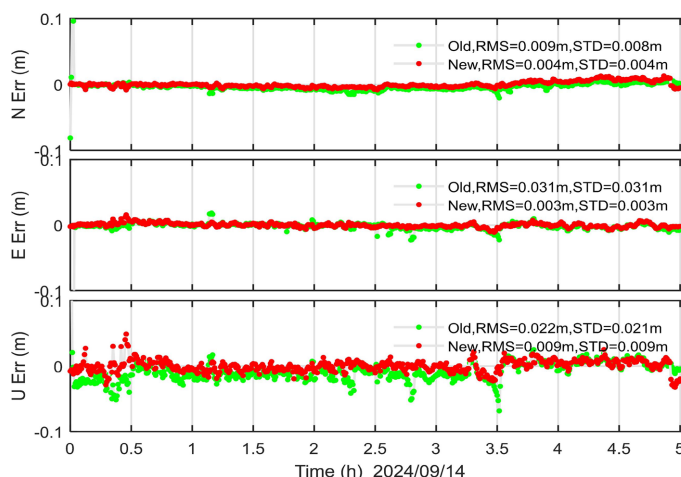


Figure 3. Accuracy comparison of different baseline solution methods on a certain day in Sep. 2024 (Old is the traditional method, New is the method proposed in this paper)

图 3. 2024 年 9 月某日不同基线解算方法精度对比(Old 为传统方法, New 为本文方法)

3) 多基站网的定位精度提升

以 2024 年 8 月某日 9994 号(位于大桥跨中)用户站的数据(如图 4 所示)为例说明三个 RTK 基站的为多基站网平差定位结果。图 4 为多基站组网平差后的模糊度固定坐标数据, 表 1 列出了四种定位结果的标准差和模糊度固定率从表中可以看出, 单基站定位存在个别历元无法固定的现象, 这主要是由于个别时段在基站或用户站可能存在数据异常, 采用多基站网平差后, 由于综合了各个基站的定位结果, 并进行了平差, 可以达到 100% 的模糊度固定率, 提高了 RTK 定位结果的稳定性。

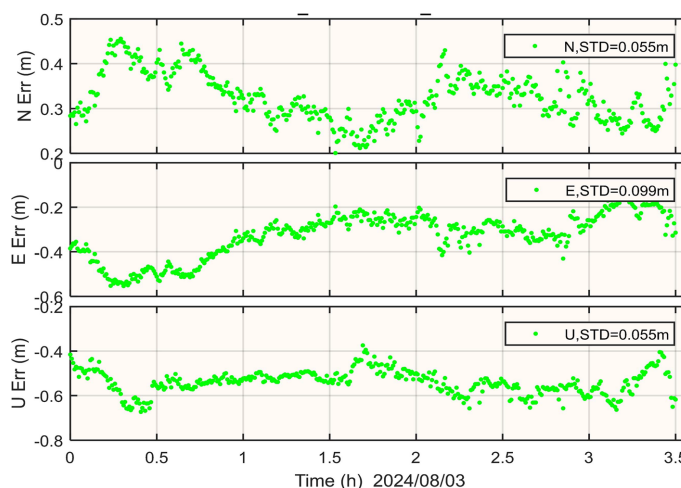


Figure 4. Coordinate data with fixed ambiguity for multi-base station network adjustment

图 4. 多基站网平差模糊度固定的坐标数据

Table 1. Single-base station and multi-base station RTK positioning results**表 1.** 单基站和多基站 RTK 定位结果

基线	北向标准差(cm)	东向标准差(cm)	高程标准差(cm)	模糊度固定率
基站 1-用户站	5.6	9.9	5.8	99.29%
基站 2-用户站	5.3	9.9	5.7	98.81%
基站 3-用户站	5.2	8.3	5.8	96.87%
多基站网平差	5.5	9.9	5.5	100%

4. 大桥基准索定位数据分析

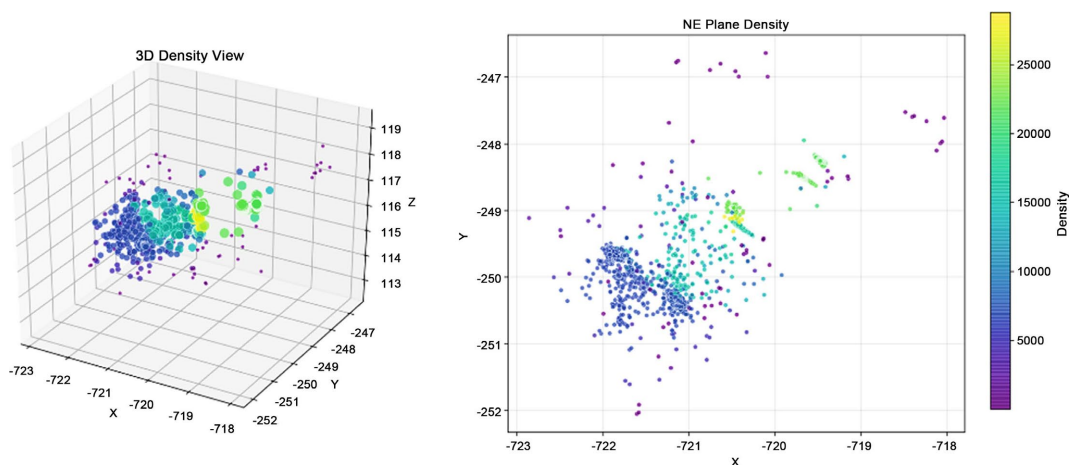
根据前面的数据质量分析、基线解算、模糊度固定、多基站网平差处理,对 2024 年 6 月至 11 月的所有数据进行处理,可以得到每个基准索点位的坐标变化情况。附表列出了所有 H7 接收机用户站的坐标序列。为了方便展示,结果已经转换至北、东及高程(NEU)坐标系,其坐标原点为 9990 基准站。使用旋转矩阵将地心坐标系转换为 NEU 坐标系,旋转矩阵如下式所示。

$$M = \begin{bmatrix} -\sin(\text{lon}0) & \cos(\text{lon}0) & 0 \\ -\sin(\text{lat}0)\cos(\text{lon}0) & -\sin(\text{lat}0)\sin(\text{lon}0) & \cos(\text{lat}0) \\ \cos(\text{lat}0)\cos(\text{lon}0) & \cos(\text{lat}0)\sin(\text{lon}0) & \sin(\text{lat}0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $\text{lon}0$ 和 $\text{lat}0$ 分别为坐标原点的经纬度,接着即可通过下式将地心坐标系转换为 NEU 坐标系。

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了更好地进行结果展示,将所有用户站的定位结果按照时间进行画图,展示主缆的坐标序列时间变化。针对主跨基准索测点,绘制其坐标的密度分布图,来确定其定位的鲁棒性,如下图所示。从图中可以看出其密度分布较为集中,虽然有少量低频点位于外侧,这是由于瞬时的定位误差,证明了该方法能够实现基准索的有效定位。图 5 给出了跨中两个用户占接收的坐标密度分布,可以看出虽然有少量结果波动,但坐标点密度更为集中,能够有效反应跨中主缆的空间坐标,证明了测量方法的有效性和鲁棒性。



(a) 9997 测点

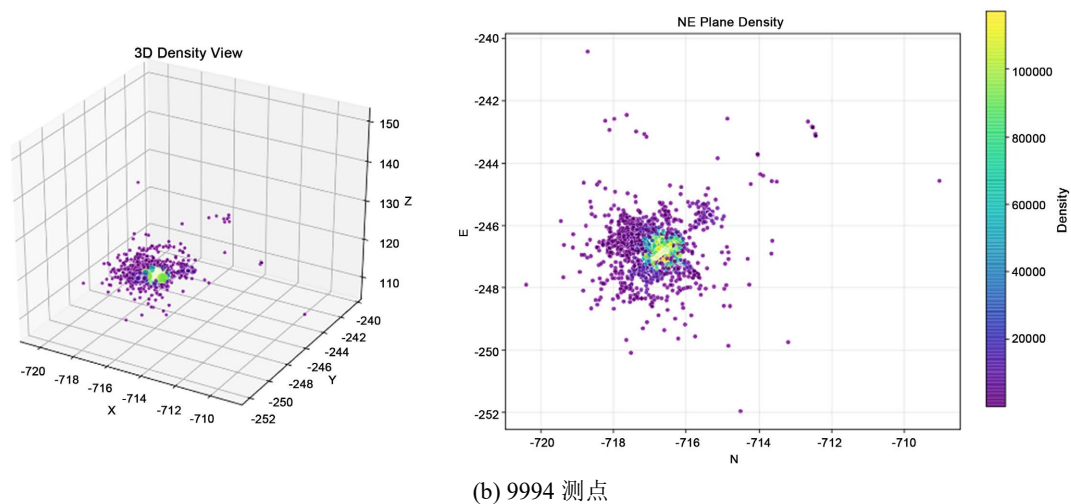


Figure 5. Coordinate density distribution of two measurement points at the mid-span of the bridge (Unit: m)
图 5. 大桥跨中两测点坐标密度分布图(单位: m)



Figure 6. Intraday average coordinate variation of the mid-span measurement points of the bridge (Unit: m)
图 6. 大桥跨中测点位日内平均坐标变化(单位: m)

针对每日内主缆线形受环境影响开展分析,坐标原点取 9990 基准站。将 6~11 月间的监测数据按日内每分钟进行平均,得到每个测点 NEU 方向的时序变化,结果如图所示。从中可以看出左侧猫道受温度影响存在一定的热胀冷缩现象,在昼夜温差影响下每日平均高程变化可达 0.2 m。在昼夜温差影响下,随着基准索的变形,日间左侧基准索会向西南方向产生位移。针对右侧基准索开展同样的分析,如图 6 所示。从中可以看出右侧主跨基准索随温度变形并不明显,这可能是因为温度应力和变形被主塔约束影响。从北方向和东方向的变形来看,也可以证明右侧基准索相较于左侧基准索受环境温度作用影响导致的变形较小。选取跨中 9994 测点作为监测指标,图 7 给出了北向、东向及高程(N, E, U)三个方向随主缆架设过程的坐标箱型图。从中可以看出,整体建设过程中,基准索在水平面坐标几乎没有发生改变,但在高程上每日均值有所升高。由此可见,通过本文提出的模型与数据相结合的部分模糊度固定方法可实现山区峡谷悬索桥主缆 GNSS 卫星定位数据离散度(噪声水平)的显著降低。由于峡谷昼夜温湿度及风场等环境不稳定因素导致主缆索股架设过程中极易出现定位数据波动,结合本文模型与数据耦合的模糊度固定方法有效剔除了山区峡谷环境不稳定因素导致的定位数据噪声,保障了接收数据的稳定及可靠性。

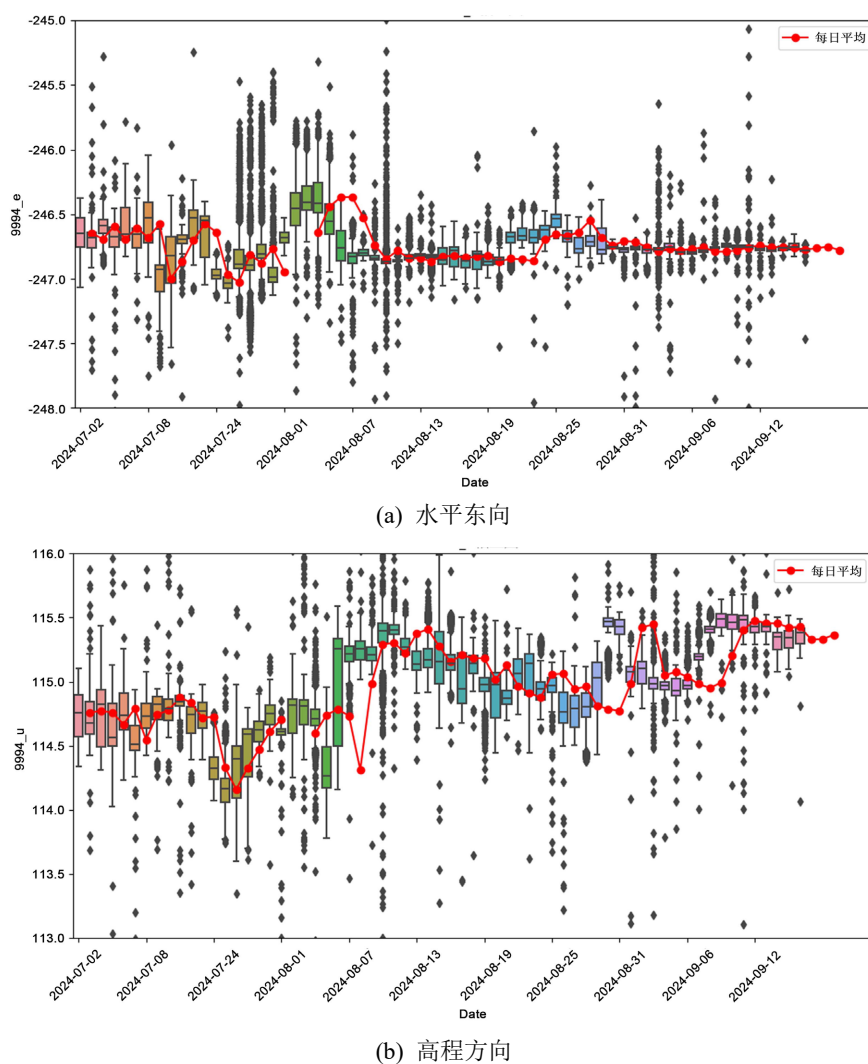


Figure 7. Time series variation of north and east direction and elevation coordinates at measurement point 9994 (Unit: m)

图 7. 9994 号测点位北和东向及高程坐标时序变化(单位: m)

5. 结论

本文针对悬索桥主缆架设过程中测量精度不足、效率低下、实时性差等关键问题,基于北斗卫星导航系统的高精度定位技术,研究了多基站联合 RTK 解算、模糊度固定优化及网平差算法,提出一种模型与数据相结合的部分模糊度固定策略和评估方法,将该方法应用于贵州山区某在建峡谷大桥的主缆架设施工定位测量及调索工作当中,实现了毫米级实时动态监测与智能化主缆架设,显著提升了施工精度和效率,为山区复杂环境下长大桥梁建设工程提供国产化自主可控的技术解决方案。

使用贵州山区某在建峡谷大桥的实测动态数据和长基线静态数据从模糊度子集固定率和基线解的精度两个方面对双重驱动的部分模糊度固定进行评估,解释了根据模糊度参数的后验方差进行粗差剔除的有效性,讨论了参与模糊度固定的最少卫星数目对定位解算的影响。同时,相比传统模糊度固定算法,本文方法的模糊度固定率和定位收敛时间都得到提升。使用多基站进行组网平差,有效提高了山区悬索桥主缆架设卫星定位测量结果的稳定及准确性。

基金项目

贵州省交通运输厅重大科技攻关项目(项目编号: 2023-122-004)。

参考文献

- [1] 王睿. 高原山区大跨度悬索桥关键施工方案研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 108-113.
- [2] 邓小康, 孙杰. 悬索桥基准索股调整计算的改进方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(12): 90-95.
- [3] 唐茂林, 宋神友, 李则均, 等. 悬索桥高精度主缆索股制作与标记法架设技术研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(6): 16-24.
- [4] 刘健, 曹冲. 全球卫星导航系统发展现状与趋势[J]. 导航定位学报, 2020, 8(1): 1-8.
- [5] 张圣. RTK 技术在金属矿山测量中的应用研究[J]. 世界有色金属, 2023(5): 16-18.
- [6] 王世进, 秘金钟, 李得海, 等. GPS/BDS 的 RTK 定位算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 621-625.
- [7] Punzet, S. and Eibert, T.F. (2023) Impact of Additional Antenna Groundplanes on RTK-GNSS Positioning Accuracy of UAVs. *Advances in Radio Science*, **20**, 23-28. <https://doi.org/10.5194/ars-20-23-2023>
- [8] 叶世榕, 赵乐文, 陈德忠, 等. 基于北斗三频的实时变形监测数据处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 722-728.
- [9] 王尔申, 王珩, 张益泽, 等. GNSS 基准站信噪比联合卫星系统综合定权的手机 RTK 定位[J]. 全球定位系统, 2024, 49(3): 65-72+93.
- [10] 高扬骏, 吕志伟, 周朋进, 等. 北斗中长基线三频模糊度解算的自适应抗差滤波算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 295-302.
- [11] 张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1084-1100.
- [12] 黄功文, 王斌, 李阳, 等. 北斗多频中长基线单历元模糊度解算分析[J]. 测绘科学, 2022, 47(12): 33-38+73.