引文格式：范小洁,赵鹏,邹崇尧,等. 利用北斗网络RTK变形监测的关键技术研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 104-107. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.10.025

利用北斗网络RTK变形监测的关键技术研究

范小洁[1]，赵　鹏[1*]，邹崇尧[1]，吴林琛[2]，魏以宽[1]
（1. 湖北省测绘工程院，湖北 武汉 430074；2. 武汉船舶通信研究所，湖北 武汉 430205）

摘　要：北斗导航系统是中国自主研发建设的卫星导航系统，是中国国家重点发展的战略性基础设施。自2000年启动建设以来，北斗系统已经取得了巨大成就。由于其具有连续监测、监测点间无需通视、不受恶劣天气影响等优势，能够高精度地实时监测变形体或者地面的几何变形量，可以对短时间内超过阈值的监测点及时报警，对长时间的监测点进行变形速率分析，已在滑坡灾害监测中进行了广泛应用。但是也存在着诸如设备成本高昂，观测数据质量要求高，滑坡体上选点选址困难等诸多限制因素。以湖北省北斗基准站网及其网络RTK定位服务为核心，在开展并完成典型区域的监测基准框架建立、虚拟参考站（VRS）监测模式精度验证和VRS虚拟观测值完好性监测，以及基于监测，基准框架的时间序列分析等工作的基础上，探讨了基于北斗的网络实时动态差分（RTK）变形监测的关键技术以及应用前景，实验结果显示实测数据和VRS虚拟观测值的基线解算结果残差时间序列在均值附近平稳波动，同时测试的2个系统GPS+BDS观测值均可以实现观测时段的95%以上的覆盖率，VRS虚拟观测值解算出的流动站坐标较为稳定，为推动湖北省连续运行卫星定位服务系统（HBCORS）在滑坡监测领域的应用提供关键技术支撑。

关键词：北斗导航系统；变形监测；虚拟参考站；基准框架
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0104-04

Research on Key Technologies of Network RTK Deformation Monitoring Based on BDS

FAN Xiaojie[1], ZHAO Peng[1], ZOU Chongyao[1], WU Linchen[2], WEI Yikuan[1]
(1. Hubei Institute of Surveying and Mapping, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Institute of Shipping Communication, Wuhan 430205, China)

Abstract: BDS is a satellite navigation system independently developed and built by China, and it is a strategic infrastructure developed by China. Since the construction started in 2000, BDS has made great achievements. Because it has the advantages of continuous monitoring, no intervisibility between monitoring points and no influence of bad weather, BDS can monitor the geometric deformation of deformed body or ground in real time with high precision, give an alarm to monitoring points that exceed the threshold in a short time, and analyze the deformation rate of monitoring points for a long time, which has been widely used in landslide disaster monitoring. However, there are also many limiting factors, such as high equipment cost, high quality of observation data and difficulty in site selection on landslide. Based on the BDS reference station network and its network RTK positioning service in Hubei Province, we discussed the key technologies and application prospects of network RTK deformation monitoring based on BDS. The experimental results show that the residual time series of measured data and VRS virtual observation baseline solution results fluctuate smoothly around the mean value. At the same time, the GPS+BDS observation values of the two systems tested can achieve more than 95% coverage of the observation period, and the coordinates of moving station calculated by VRS virtual observation value are stable. This study can provide key technical support for promoting the application of HBCORS in the field of landslide monitoring.

Key words: BDS, deformation monitoring, VRS, reference frame

湖北省地质条件复杂，长江横贯湖北全境，汉江、清江等各级支流纵横密布，坡陡谷深，斜坡劣质化严重。近年来，全省降雨时空分布极不均衡，暴雨中心众多，伏秋连汛，局地强降雨频现，极端气候发生频率增多。随着社会经济的飞速发展，人类工程活动影响明显加剧，地质灾害呈现随机性加大、隐蔽性加强和破坏性加剧的特点，诸多因素导致我省地质灾害多发频发，防灾减灾形势尤为严峻。本文围绕湖北省地基增强系统在滑坡监测应用中的关键技术展开研究。

收稿日期：2024-06-28。
项目来源：湖北省自然资源厅科技资助项目（zrzy2023kj07）。
第一作者简介：范小洁（1975—），硕士，从事测绘地理信息管理工作，E-mail：7301306@qq.com。
通信作者：赵鹏（1981—），硕士，高级工程师，从事GIS应用和卫星导航定位服务相关工作，E-mail：7301306@qq.com。

1　研究区概况

本文选取湖北省恩施州巴东县黄土坡滑坡监测区域作为建立监测基准框架[1-5]的典型区域。黄土坡是葛洲坝工程移民巴东县城搬迁新址，曾是巴东县的政治、经济和文化中心。1985年以来，有关科研单位、地勘队伍围绕黄土坡地质环境问题开展了一系列的调查、勘察和科研工作，确认黄土坡属大型岩质古滑坡。滑坡由临江I#崩滑堆积体、临江II#崩滑堆积体、变电站滑坡、园艺场滑坡四部分组成，前缘高程80 m，后缘高程650 m，面积1.358 km^2，体积6 934万m^3。

2　技术路线

本项目开展了HBCORS虚拟基准站用于滑坡灾害监测的精度验证工作。一是利用黄土坡特大型滑坡体GNSS观测数据和HBCORS基准站GNSS观测数据建立ITRF14基准框架和区域监测基准框架；二是利用HBCORS生成的区域VRS观测数据开展VRS定位精度分析，并结合以上两项工作内容实现典型监测场景应用，具体技术路线如下图1所示。

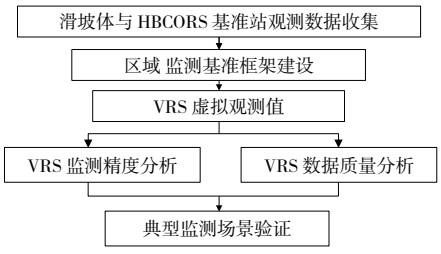


图1　技术路线图

3　数据收集与整理

研究区已有数据情况：

1）2019—2020年间巴东的历史观测数据和巴东附近6个HBCORS站点的GNSS北斗观测数据（RINEX3.02格式）。

2）巴东历史观测数据包括2019年年积日170 d至2019年年积日297 d和2020年年积日60 d至2020年年积日197 d的监测站CHC1–5数据以及CHC6基准站数据；和所选用的6个HBCORS站点编号分别为A、B、C、D、E、F，其点位位置分别如下图2、3所示。

数据整理将数据转换成标准格式，内容包括：观测数据转换为采样率30 s的RINEX 3.02格式、HBCORS站数据为天宝T02，利用T02–Rinex转换工具和批量转换脚本进行格式转换；文件统一采用标准的11位字符命名整理；接收机和天线类型整理。



图2　监测点示意图

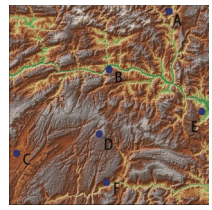


图3　所选用的6个HBCORS站

4　区域基准框架建立

基线处理主要流程为：数据准备、数据预处理、参数估计、残差编辑及模糊度固定5个步骤。数据准备阶段输入观测文件及其他配置文件后，首先对数据质量进行初步分析，如周跳探测，并将数据格式调整至软件对应输入格式，然后在参数估计模块进行解算。在获得初步解算结果后对解算残差进行分析，进一步剔除数据中存在的粗差。迭代数次至无粗差探出后，模糊度固定模块实现模糊度固定，最后输出固定解结果，包括坐标和基线结果[6-9]。利用监测区域监测站点CHC1~CHC6与周边HBCORS基准站的观测数据，通过相对定位的方式得到基线解算结果。

以HBCORS基准站作为起算点对基线解算结果进行三维约束，获取实验开始历元下各监测站点的区域基准精确坐标。为观察各监测站点位移情况，将得到的各历元区域基准框架坐标与平均坐标作差，形成坐标时间序列，1号监测站点结果如图4所示。

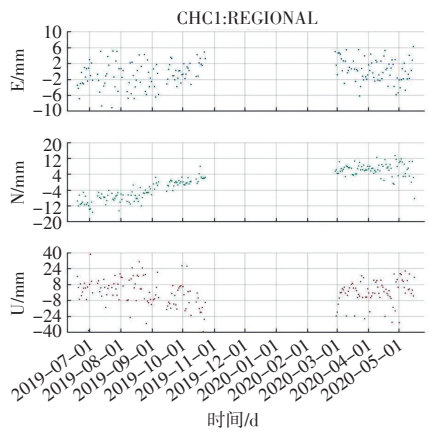


图4　2019–2020年CHC1监测站坐标时间序列

通过分析监测站点的速度场信息，发现在传统RTK模式下，若基准站不稳定则会将位移误差传递到监测点，这说明建立区域监测基准框架，分析基准站的稳定性是必要的。

5　VRS监测模式精度验证

基线处理流程主要包括数据准备、数据预处理、基线解算以及剔除异常卫星4个模块。数据准备阶段主要是对收集到的数据进行整理，包括统一转换到

RINEX 3.X格式，文件命名标准化，下载对应时段广播星历等；数据预处理主要是对整理好的观测文件进行质量检查，包括数据完整率、多路径效应与周跳比等的检查，若存在数据质量较差的卫星，需在此步剔除；基线解算，就是利用RTKPOST对所选取的基准站与流动站观测数据进行差分定位，得到测站间相对位置信息以及模糊度固定率、卫星观测值残差等信息；若基线解算得到的模糊度固定率未超过80%，会造成后续监测精度评价存在长时间数据缺失的情况，因此需要剔除异常卫星。

常规监测模式下，基准站是整个监测区的起算基准，一旦其遭遇异常状况，就会直接影响整个监测区域。而利用VRS参考站，直接服务于区域内的监测站，有着基站建设零成本、不受观测条件约束、选址机动灵活等优势。为验证精度，本文利用湖北省地基增强系统生成VRS虚拟观测值，并与实测基线静态相对定位（SGM）监测模式、RTK监测模式下的监测精度进行对比[10-12]。

同步采集超短基线实测双频GNSS观测值与国产系统A、国产系统B的VRS虚拟观测值数据并整理；使用数据质量分析软件BDQA对所得数据进行数据质量分析；使用RTKLIB进行基线解算，分别得到RTK模式和SGM模式下的解算结果，其中SGM模式包括10 min时段解、30 min时段解与1 h解；以超短基线实测数据解算结果为参考，分析各系统VRS虚拟观测值在RTK模式和SGM模式下的监测精度。

5.1 数据质量分析

本文针对收集到的4组观测数据，从数据完整率、信噪比、周跳比、多路径效应等方面对所有站的数据质量进行了分析[13-14]，具体讨论如下：

1）VRS虚拟观测值中，GLONASS系统观测数据缺失严重，且多路径效应影响过大，若将其加入基线解算，将严重影响模糊度固定率和最终解算精度。因此在基线处理中，需要将GLONASS排除，同时后续也不再进行进一步分析。

2）使用数据质量分析软件BDQA对超短基线实测和VRS虚拟观测值数据进行质量分析发现超短基线实测数据的观测质量较好，因此以测站全观测时段实测数据解算出的基线结果可靠性较高，可以作为评价VRS虚拟观测值监测精度的参考值；国产系统A和国产系统B的VRS虚拟观测值数据完整率和信噪比均较高，与实测数据无明显差异；VRS虚拟观测值的多路径效应较强，可能会影响基线解算的精度；国产系统A的观测值与周跳之比较小，说明周跳较多，这将影响模糊度的固定。

5.2 基于基准站实测数据解算精度分析

1）RTK模式。hc02实测数据与hc01实测数据RTK模式差分定位结果的固定解序列如图5所示。

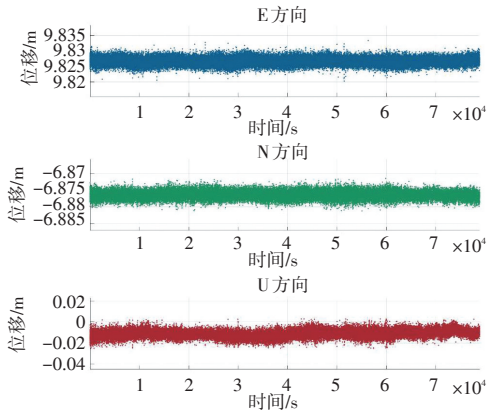


图5 实测基线固定解ENU坐标序列

实测基线RTK模式下固定解ENU3个方向的平均值与STD统计如表1所示。

表1 实测基线RTK模式固定解结果统计

统计参数	E方向	N方向	U方向
平均值/m	9.827	−6.876	−0.011
STD/cm	0.17	0.12	0.35

2）SGM模式。将实测基线全测量时段的最终测量结果作为高精度的基线向量参考值，计算出SGM模式下时段解的残差。统计结果如表2所示。

表2 实测基线SGM模式监测各时段解残差

时段长度	STD/cm		
	E方向	N方向	U方向
10 min	0.02	0.02	0.15
30 min	0.02	0.02	0.14
1 h	0.02	0.02	0.14

5.3 基于VRS虚拟观测值解算精度分析

1）RTK模式。多VRS虚拟观测值与hc01实测数据RTK模式差分定位结果。表明国产系统B固定解ENU坐标序列存在明显变化，如前文所述，这是由虚拟点位发生变化造成的。消除虚拟点位变化造成的干扰后，计算出各系统VRS虚拟观测值RTK模式下固定解与高精度基线向量参考值的残差，并统计各系统残差平均值与STD，其结果如下表3所示。

观察表3可以发现，由于虚拟点位异常，国产系统B的结算结果显著偏离原点，而国产系统A的虚拟点位的平面位置则始终位于流动站hc02附近，不过其高程方向存在约17.4 cm的系统性偏差。此外，经过平移修正后的国产系统B的STD要小于国产系统A的STD，这可能是因为国产系统B的VRS虚拟观测值中包含北斗三号卫星数据，而国产系统A则没有，随着时段长度的增加，VRS虚拟观测值的时段解STD会不

表3　VRS虚拟观测值RTK模式固定解结果统计

统计参数	国产系统B			国产系统A		
	E方向	N方向	U方向	E方向	N方向	U方向
平均值/m	−14.780	332.601	29.386	0.000	0.023	0.174
STD/cm	0.83	0.87	2.07	1.34	1.63	4.72

断降低；国产系统B的STD较于国产系统A更小，这说明若能解决虚拟点位变化的问题，国产系统B在VRS监测方面具有很大的潜力。

2）SGM模式。计算出SGM模式下时段解的残差，并绘制序列图，SGM模式时段解残差STD统计如表4所示。

表4　VRS虚拟观测值SGM模式监测各时段解残差STD

时段长度	国产系统B			国产系统A		
	E方向 STD/cm	N方向 STD/cm	U方向 STD/cm	E方向 STD/cm	N方向 STD/cm	U方向 STD/cm
3 min	0.78	0.85	1.87	1.41	1.59	4.70
5 min	0.74	0.82	1.79	1.46	1.57	4.69
10 min	0.69	0.75	1.59	1.46	1.49	4.54
30 min	0.59	0.67	1.19	1.29	1.26	3.79
1 h	0.52	0.59	1.08	0.97	0.95	2.82

为进行时段解的残差分析，通过绘制2个系统各时段的残差直方图分析（由于篇幅限制列出5 min直方图如图6、7所示）。

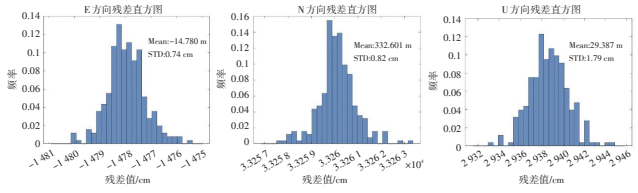


图6　国产B系统5 min时段解残差直方图

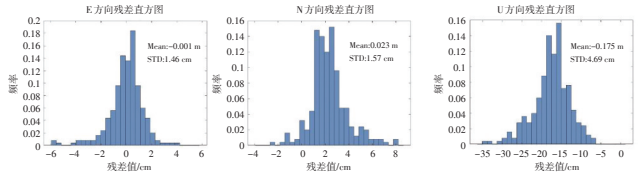


图7　国产A系统5 min时段解残差直方图

国产系统B和国产系统A的残差直方图与实测结果相似，时段解数量较多的3 min时段解与5 min时段解的残差更加接近于正态分布，而随着时段长度的增加，时段解数量相应减少，残差值正态分布的特征逐渐减弱，但仍总体分布在均值左右两倍的标准差范围内。这表明，国产系统A与消除虚拟点位变化影响的国产系统B虚拟观测值解算结果中异常值较少，无残余系统误差。同时，为进一步验证上述有关时段解残差分布特征的结论，使用正态分布函数对残差序列的统计结果进行拟合，并将拟合得到的得到数学期望与方差，与残差序列的样本均值与样本方差进行比较，虚拟观测值解算结果残差序列可知，正态分布拟合所得的数学期望与方差和统计所得的样本均值与样本方差基本一致，进一步验证了虚拟观测值时段解残差基本符合正态分布的结论。

实测数据和VRS虚拟观测值的基线解算结果残差时间序列在均值附近平稳波动，残差直方图具有明显的正态分布特征，且使用正态分布拟合的数学期望与方差和统计出的样本均值与样本方差基本一致，说明本项目此次实验所得结果的异常值很少，结论可靠性较高。

6　语　结

本文以湖北省北斗基准站网及其网络RTK定位服务为核心，开展并完成了典型区域的监测基准框架建立，VRS监测模式精度验证。本文成果可为推动HB-CORS在滑坡监测领域的应用提供关键技术支撑。

1）分别通过建立地方区域基准框架和非差精密单点定位的方式，得到监测站点的区域基准框架坐标，通过分析监测站点的速度场信息，发现在传统RTK模式下，若基准站不稳定则会将位移误差传递到监测点，这说明建立区域监测基准框架，分析基准站的稳定性是必要的。

2）分别对比VRS虚拟观测值与超短基线实测结果：基于VRS虚拟观测值计算出的基线解算结果残差时间序列[15]在均值附近平稳波动，对比国产系统B的VRS虚拟观测值与国产系统AVRS虚拟观测值，随着时段长度的增加，VRS虚拟观测值的时段解STD会不断降低，国产系统B的STD较于天宝系统更小，具备北斗三号观测数据的国产系统B的VRS虚拟观测值的数据质量均优于国产系统A；从解算结果来看，无论是RTK模式下初次解算的模糊度固定率与固定解STD，还是SGM模式下时段解的STD，国产系统B的VRS虚拟观测值的结果均显著优于国产系统A。

参考文献

[1] 党亚民,蒋涛,杨元喜,等. 中国大地测量研究进展(2019—2023)[J]. 测绘学报,2023, 52(9):1 419-1 436

[2] 王小维,刘全海,孙雪梅. CGCS2000基准框架建立及关键技术研究[J]. 矿山测量,2022, 50(1):43-47

[3] 刘清,甘建军,陈浩,等. 持续降雨下阳高山滑坡变形机理与稳定性分析[J]. 南昌工程学院学报,2023,42(6):52-58

[4] 贾雨,黄凯宁,王贻龙,等. 基于物联网的山体滑坡监测系统设计[J]. 集成电路应用, 2023,40(12):377-379

[5] 甘雨,张清华,荣凤娟,等. 湖南石门雷家山滑坡北斗只能监测与预警[J]. 测绘与空间地理信息, 2023,46(11):17-20,25

[6] 马成,凡艳伟,张澄. 北斗三号双频长基线单历元解算性能评估 [J]. 地理空间信息, 2023,21(5):91-95

（下转第116页）