引文格式：史波,艾青松,张斌,等. BDS基准网处理技术在大坝安全监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 57-61. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.011

BDS基准网处理技术在大坝安全监测中的应用

史　波[1]，艾青松[1,2,3*]，张　斌[1]，徐　黎[1]，唐　朝[1]，李永华[1]
（1. 长江空间信息技术工程有限公司（武汉），湖北 武汉 430014；2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室，湖北 武汉 430077；3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430014）

摘　要：为准确了解大坝安全状态，减少传统大坝安全监测受气候、环境等因素的影响，基于BDS基准网处理技术实现了大坝安全监测自动化。在BDS基准网处理中，采用双差基线解算模型，并构建大气延迟修正算法，开发了BDS基准网处理软件。通过该软件在国内某大型水利大坝开展BDS安全监测应用测试，并将测试结果与商用软件TBC+COSA进行对比。结果表明，该软件在实验区域内的监测精度与商用软件相当，基于BDS-3和BDS-2/BDS-3两种模式下的水平定位精度均能达到±1 mm，说明该软件的解算成果可靠，也充分说明基于BDS-3的基准网处理技术可满足高精度自动化大坝安全监测的要求。

关键词：大坝安全监测；BDS基准网；双差基线解算；大气延迟修正；水平定位精度
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0057-05

Application of BDS Datum Network Processing Technology in Dam Safety Monitoring

SI Bo[1], AI Qingsong[1,2,3], ZHANG Bin[1], XU Li[1], TANG Zhao[1], LI Yonghua[1]
(1. Changjiang Space Information Technology Engineering Co., Ltd. (Wuhan), Wuhan 430014, China;
2. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Wuhan 430077, China;
3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: In order to accurately obtain the dam status and reduce the influences of traditional dam safety monitoring by climate, environment and other factors, we realized the automation of dam safety monitoring based on BDS datum network processing technology. In the BDS datum network processing, we used double-difference baseline solution model to construct an atmospheric delay correction algorithm, and developed the BDS datum network processing software. Then, we used this software to carry out application tests in a water conservancy dam, and compared the results with the commercial software TBC+COSA. The results show that the monitoring accuracy of this software is comparable to that of the commercial software in this area, and the horizontal positioning accuracy based on BDS-3 and BDS-2/BDS-3 modes can reach ±1 mm, which indicates that the solution of this software are reliable, and fully demonstrates that the datum network processing technology based on BDS-3 can satisfy the requirements of high-precision automation dam safety monitoring.

Key words: dam safety monitoring, BDS datum network, double-difference baseline solution, atmospheric delay correction, horizontal positioning accuracy

北斗卫星导航系统（BDS）是由我国自主设计、独立运行的全球导航卫星系统（GNSS）。BDS现已完成“三步走”发展战略，即2000年底建成的服务范围为中国区域的北斗一号系统，2012年12月起提供亚太区域服务的北斗二号系统（BDS-2）以及2020年7月31日完成全球组网正式为全球用户提供全天候导航服务的北斗三号系统（BDS-3）[1-2]。随着BDS的发展，目前正常在轨运行的卫星数量也在逐渐增多。截至2024年4月，在轨的全球BDS是BDS-2和BDS-3系统，在轨运行的BDS-2卫星15颗、BDS-3卫星37颗。BDS卫星的逐步更新和升级为提升导航系统的服务性能提供了重要支撑，也为全面分析BDS服务性能提供了研究方向。

在工程水平位移变形监测中，GNSS技术因其定

收稿日期：2024-06-27。
项目来源：湖北省自然科学基金资助项目（2023AFB435）；大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目（SKLGED2024-3-3）；湖北省博士后创新研究岗位资助项目（R22R6201）。
第一作者简介：史波（1986—），硕士，高级工程师，主要从事北斗/GNSS高精度安全监测算法研究工作，E-mail：673273050@qq.com。
通信作者：艾青松（1991—），博士，高级工程师，主要从事北斗/GNSS精密卫星钟差估计与高精度定位算法研究工作，E-mail：aiqingsong@cjwsjy.com.cn。

位精度高、观测时间短、可全天候作业、操作简便、效率高、总费用低等优势得到了大量应用[3]。然而，以往大多数研究工作都是基于GPS或多系统组合形式进行的[4-7]，对单BDS在水利工程领域安全监测方面的应用较少。此外，由于BDS-2在轨服务时间较长，部分卫星正常在轨运行时长达到14年，基本超过设计寿命，随着导航系统的进一步发展，BDS-2卫星将逐步退役，届时BDS将全由BDS-3卫星构成，因此有必要对BDS-3系统服务性能进行评估分析。本文以国内某水利大坝安全监测为例，采用自主研发的BDS基准站网处理软件进行测试。首先基于大坝各监测点的观测数据分别对BDS-2和BDS-3的数据质量进行分析；然后采用处理软件对各测点的位置信息进行持续解算，进行大坝安全监测；最后对BDS-2与BDS-3融合（BDS-2/BDS-3）和BDS-3单独处理两种模式进行定位测试，以检验单独采用BDS-3进行水利大坝自动化安全监测的性能。

1 BDS观测数据质量分析

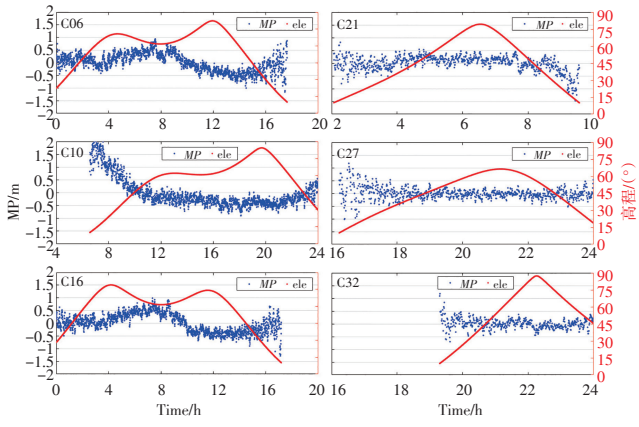
1.1 BDS观测数据多路径误差分析

在卫星导航测量中，若测站周围反射的卫星信号进入接收机天线，则将与直接来自卫星的信号产生干涉，从而使观测值偏离真值，这种由多路径信号传播引起的干涉时延效应称为多路径误差[8-9]。多路径误差与卫星相对于天线的空间关系以及天线周围的地物环境有关[10]，不仅影响观测值的精度，严重时还会使信号失锁，是GNSS短基线高精度测量的主要误差源。多路径组合的定义为[11]：

$$MP_j = \frac{2f_i^2}{f_j^2 - f_i^2}\lambda_i\varphi_i - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_j^2 - f_i^2}\lambda_j\varphi_j + P_j - C_{ij} \quad (1)$$

式中，λ_i、λ_j为频点i、j的观测信号波长；f_i、f_j为频点i、j的频率；P为伪距观测值；φ为载波相位观测值；C_{ij}为常数，可通过连续弧段的平均值将其去除。

已有大量研究工作表明，BDS-2卫星的伪距多路径存在明显的与高度角相关的系统性误差，将会影响高精度的性能[12]。因此，本文在采用BDS观测数据进行基准网定位解算前，对监测点的数据质量进行了分析，具体结果见图1，BDS-2和BDS-3的多路径误差存在一定的差异，BDS-3卫星的多路径较平稳，未见明显的系统性变化，即整体呈现白噪声特性；BDS-2卫星的多路径与高度角存在一定的负相关特性。对各卫星进行统计分析发现，BDS-2卫星的多路径误差较显著，最大可达±1 m，多天内平均值可达0.47 m；BDS-3卫星的多路径基本在±0.5 m，且平均值约为0.23 m，明显优于BDS-2卫星。因此，在基于BDS-2观测信号进行数据处理前，应对该误差进行改正。



a BDS-2卫星　　b BDS-3卫星

图1 BDS-2和BDS-3卫星的伪距多路径误差

1.2 BDS观测数据载噪比分析

载噪比（SNR）作为反映载波相位观测质量的指标，通常表示为C/N0，单位为dB-Hz，其数值越大，表明观测数据质量越好[13]。SNR主要受天线增益参数、接收机中相关器的状态和多路径效应3个方面的影响[14]，可通过提取观测值中的信息得到。如图2所示，各BDS卫星的SNR存在很好的一致性，随着高度角的变大而增大，总体变化范围为30~55 dB-Hz，当高度角达到60°时，SNR变化趋于平稳；BDS-3卫星的SNR比BDS-2大2~3 dB-Hz，说明BDS-3卫星的数据质量优于BDS-2卫星；各频率SNR也存在很好的一致性，B3I的SNR略大于B1I。统计发现，卫星SNR均值范围为45~47 dB-Hz，B1I、B3I作为BDS-2和BDS-3卫星的公共频率，为BDS-2和BDS-3卫星的融合提供了良好基础。此外，BDS-3更强的抗多径能力和更大的SNR说明BDS系统的服务性能正在进一步升级。

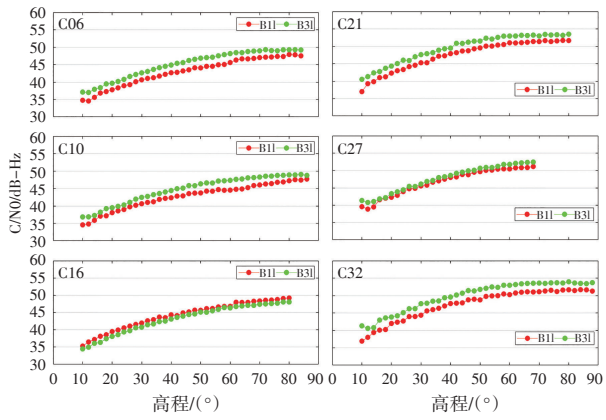


图2 BDS卫星B1I和B3I频率的观测值SNR

1.3 BDS观测数据的位置精度因子分析

位置精度因子（PDOP）反映了卫星空间几何分布影响造成的伪距测量误差与用户位置误差间的比

例。卫星分布程度越好，PDOP数值越小，定位精度越高[15]。实际应用中PDOP体现为用户位置的径向误差与用户到卫星的距离测量误差的比值。因此，为明确该区域内各站点的观测环境，对各监测站的可视卫星数量和PDOP值进行了分析。各测点的PDOP值可通过卫星高度角 α 和方位角 β 求得。n 颗卫星对应观测方程的系数矩阵 $\boldsymbol{H}$ 可表示为：

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\cos\alpha_1\sin\beta_1 & \cos\alpha_1\cos\beta_1 & \sin\alpha_1 & 1\\ \cos\alpha_2\sin\beta_2 & \cos\alpha_2\cos\beta_2 & \sin\alpha_2 & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \cos\alpha_n\sin\beta_n & \cos\alpha_n\cos\beta_n & \sin\alpha_n & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

根据系数矩阵采用式（3）、（4）即可获得对应测点PDOP信息。

$$\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1}=\begin{bmatrix}q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14}\\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24}\\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34}\\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44}\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathrm{PDOP}=\sqrt{q_{11}+q_{22}+q_{33}} \tag{4}$$

由BDS-2/BDS-3各历元的PDOP值和可视卫星数量（图3）可知，该水利大坝所在区域测点的观测环境较好，BDS可视卫星数量较多，基本可达到20颗以上，PDOP值稳定在1.2左右；BDS-3各监测点的可视卫星数量约为12颗，PDOP值基本在1.6~1.9之间。总体而言，该区域的PDOP值都在2以内，卫星的空间几何构型极为可观，说明该区域监测点的BDS卫星分布和监测点布置较合理，能为高精度安全监测提供可靠的数据基础。相较而言，BDS-2/BDS-3全星座比BDS-3具有更多的可视卫星数量和更加稳定的卫星数量分布空间几何强度。在5个监测点中，TP03、TP04、TP05比TP01和TP02具有更多的可视卫星，因此其对应的PDOP值更小。

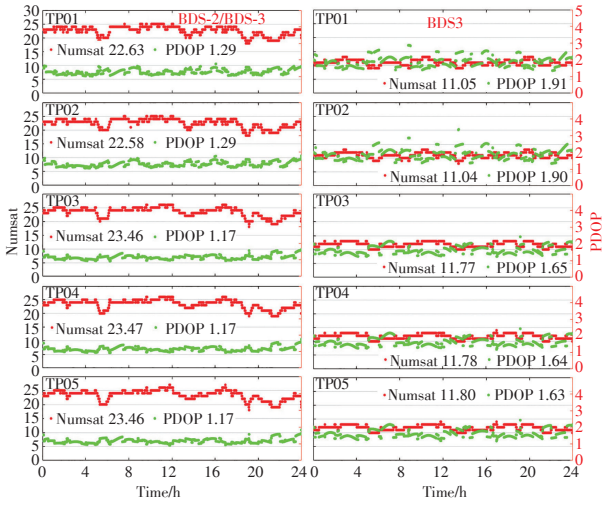


图3　某水利大坝安全监测各监测点的BDS可视卫星数量与PDOP值

2　基于BDS的水利大坝安全监测

本文的大坝安全监测测试采用自主研发的北斗基准网技术大坝安全监测软件，核心处理算法是基准站多基线解算和整体最小二乘网平差解算两个模块。

2.1　基于BDS的基准网多基线解算

双差基线解算模型是先在基准站与流动站之间求一次差，然后在卫星之间求二次差。假设基准站为b，流动站为r，参考卫星为k，非参考卫星为s，则经过线性化后的站星伪距和载波相位双差观测方程为[16-17]：

$$\begin{cases}E[\Delta L_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}]=\boldsymbol{e}_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}\times\Delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{b,r}}+\Delta m_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}\times\tau_{\mathrm{br}}+\Delta N_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}\\ E[\Delta P_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}]=\boldsymbol{e}_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}\times\Delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{b,r}}+\Delta m_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}\times\tau_{\mathrm{br}}\end{cases} \tag{5}$$

式中，Δ 为差分算子；L、P 分别为伪距和载波相位观测值；$E[]$ 为数学期望；$\boldsymbol{e}_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}$ 为测站与各观测卫星在视线方向上的三维向量；$\Delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{b,r}}$ 为流动站与基准站之间的待求基线向量；τ_{br} 为差分对流层延迟误差；ΔN 为双差模糊度；$\Delta m_{\mathrm{b,r}}^{\mathrm{k,s}}$ 为对流层投影系数站星对差分信息。

站星双差观测模型中消除了接收机钟差和卫星钟差以及卫星端的初始相位与伪距硬件延迟误差，因此其模糊度参数具有整周特性。由于水利大坝所处地区大高差所对应的垂直梯度气象条件存在非平稳特性，导致对流层延迟差异显著，因此常规的短基线忽略对流层影响的观测模型不再适用。本文充分考虑了对流层在不同方向的梯度变化、非线性变化和高程变化的特点，构建了差分对流层信息约束模型，即

$$\begin{cases}\tau_{\mathrm{br}}(i)=a_0+a_1\Delta x+a_2\Delta y+a_3h+\\ k_1a_4\Delta x\Delta y+k_2(a_5\Delta x^2+a_6\Delta y^2)\\ \sigma_{\tau_{\mathrm{br}}}^2=\sigma_0^2/(\exp(d)+\exp(-d))\\ k_1=0\ \text{or}\ 1\\ k_2=0\ \text{or}\ 1\end{cases} \tag{6}$$

式中，$a_i(i=1,2,\cdots,6)$ 为天顶对流层多项式系数，根据稳定的基准点拟合得到；Δx、Δy 分别为测点到参考测点的二维坐标差值；h 为测点的大地高信息，由于各测点地理、气候存在差异，需根据各测点基线对的地理环境测试自适应确定；k_1、k_2 为调节系数，以此确定最适合的拟合模型。

在此过程中随机模型根据高斯函数辅助方差信息 $\sigma_{\tau_{\mathrm{rb}}}^2=\sigma_0^2/(\exp(d)+\exp(-d))$ 构建，d 为对应监测点到基准点的距离，根据经验选取 $\sigma_0^2=2\times10^{-6}$ 作为对流层

区域精度因子。将数据预处理后的观测值引入基线解算模型，以实现各测点与基准站之间的基线解算；参数估计结果采用DIA验后数据质量控制，通过探测、辨识和调节3个步骤消除可能存在的模型偏差，提升参数估计的可靠性；固定解算部分模糊度，获得对应的基线解算结果，并基于观测值残差、数据完整率和单位权方差进行基线检验。

2.2 基线测量网平差

将基线解算合格结果与基准站坐标信息联合进行三维无约束解算；再将平差得到的三维坐标及其随机信息转换到二维平面坐标系中。坐标转化的具体步骤为：①根据高斯投影正算算法，将监测网三维无约束平差成果的空间直角坐标转换到平面二维大坝坐标系下；②将二维平面坐标及其方差—协方差作为虚拟观测值，加入起算点约束，建立平差的数学模型；③进行二维约束平差解算，获得对应测点在大坝坐标系下的坐标，实现基于北斗基准网处理的大坝安全监测（图4）。以行业内公认的商用高精度GNSS数据处理软件TBC+COSA为参考，进行精度分析。

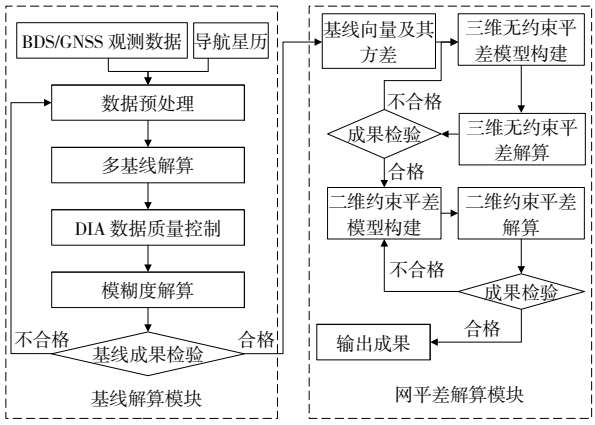


图4 BDS基准网技术大坝安全监测软件算法流程图

2.3 实验结果与分析

水利大坝安全监测测点分布在大坝两侧（图5），由5个监测点（圆点）和2个基准点（五角星）构成。监测点TP01~TP02位于不同监测断面的马道上，TP03~TP05位于大坝坝面，基准点TP06、TP07位于两侧坝顶。观测数据采集采用国产华测CHC N71接收机和支持BDS全频点的C220GR扼流圈天线。实验的采样间隔为30 s，观测时段为2023年11月6日—12月9日（年积日为310~343），截止高度角为10°。基于该时段各天的观测数据和广播星历、基准点坐标进行双差基线解算和网平差处理，并分析各监测点位的位置变化。

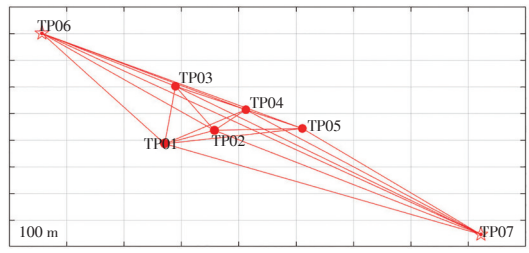


图5 某水利大坝安全监测测点分布图

基于上述测试数据和自主研发软件进行测试，监测成果见图6，BDS-3与BDS-2/BDS-3的解算精度相当，对应5个监测站的结果在±1 mm上下波动，说明自主研发软件与TBC+COSA软件的结果具有很好的一致性。对比各监测点的解算精度发现，TP05测点精度优于其他测点，而TP01和TP02精度略差，其主要原因在于TP01和TP02测点位于大坝马道上，坝体对测点接收观测信号存在一定遮挡，而TP05测点位于坝顶视野开阔，通视情况更好，可视卫星数量更多，这一点通过对比各监测点的可视卫星数量和PDOP值分布也可以得到。总体而言，BDS-3能得到与BDS-2/BDS-3精度一致的结果，具有很高的定位精度；同时结合BDS-3在该区域内的数据质量，充分说明随着BDS-2卫星的逐步退役，单独采用BDS-3完全能获得精准可信的位置变化信息，可满足水利大坝高精度安全监测的要求。

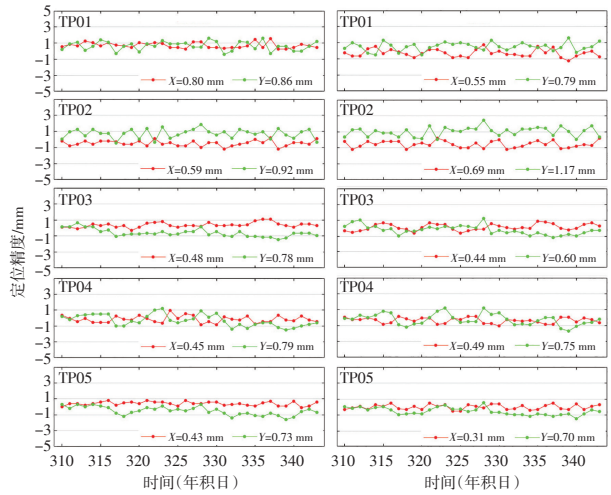


图6 大坝各测点的累计误差分布图

3 结 语

本文对国内某大型水利大坝监测站的BDS可视卫星数量、PDOP值、多路径误差、SNR和自主研发软件进行了定位精度分析。结果表明，实验区域内BDS-2和BDS-3的卫星数量均能达到10颗以上，各监测点对应的PDOP值均优于2，监测点所在位置的空间几何构

型较好；BDS-3卫星的伪距多路径相对稳定，且优于BDS-2卫星，基本在0.5 m以内；B1I、B3I频率的多路径趋势基本一致，不存在与高度角相关的线性变化趋势；BDS-3的SNR略优于BDS-2，均值范围为43~49 dB-Hz。总体而言，BDS-3的数据质量更好，说明BDS系统的服务性能正在进一步升级。

在自主研发的软件中构建差分对流层延迟模型，顾及对流层在不同方向的梯度变化、非线性变化和高程变化的特点，构建了差分对流层信息约束模型，实现大高差环境的大气延迟约束。将BDS-2/BDS-3和BDS-3两组基准网处理解算结果与商用软件进行对比发现，两种模式定位精度基本相当，均在±1 mm范围内，完全能满足水利大坝安全监测要求，这也证明了差分对流层信息约束模型的有效性。相较于BDS-2/BDS-3联合解算，单独采用BDS-3的精度同样可观，能达到与联合解算相当的精度。随着BDS的进一步发展，BDS-2卫星将逐步老化退役，BDS-3卫星完全能为水利大坝高精度安全监测提供可靠的技术保障。

参考文献

[1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,39(1):1-6

[2] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报,2013,1(1):3-8

[3] 王豪威. 基于GNSS的边坡自动化监测系统应用研究[J]. 地理空间信息,2022,20(4):172-174

[4] 韩军强. 高精度GNSS实时滑坡变形监测技术及环境建模分析研究[J]. 测绘学报,2020,49(3):397

[5] 张勤,白正伟,黄观文,等. GNSS滑坡监测预警技术进展[J]. 测绘学报,2022,51(10):1 985-2 000

[6] 刘卓伟. 浅析GPS技术在地形复杂矿山变形监测中的应用[J]. 中国金属通报,2023(6):150-152

[7] 姜卫平,梁娱涵,余再康,等. 卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1 625-1 634

[8] 尹斌权,岳东杰,陈健,等. 北斗GEO卫星多路径特性在SPP中的应用[J]. 地理空间信息,2019,17(3):31-34

[9] 尹子明,陈明剑,刘天恒,等. 基于三频信噪比的北斗多路径检测[J]. 地理空间信息,2017,15(2):26-29

[10] 布金伟,左小清,金立新,等. BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(4):574-585

[11] Yan X, Huang G, Zhang Q, et al. Early Analysis of Precise Orbit and Clock Offset Determination for the Satellites of the Global BDS-3 System[J]. Advances in Space Research, 2019,63(3):1 270-1 279

[12] Tan B, Ai Q, Yuan Y. Analysis of Precise Orbit Determination of BDS-3 MEO and IGSO Satellites Based on Several Dual-frequency Measurement Combinations[J]. Remote Sensing,2022,14(23):6 030

[13] 周秀一,王井利,李如仁,等. 基于BDS卫星信噪比反演海平面高度研究[J]. 地理空间信息,2023,21(7):44-48

[14] Yang Y, Xu Y, Li J, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System[J]. Science China Earth Sciences,2018,61:614-624

[15] 唐卫明,徐坤,金蕾,等. 北斗/GPS组合伪距单点定位性能测试和分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 529-533

[16] 蒲亚坤,袁运斌,丁文武,等. GPS/BDS-2/Galileo混合双差相对定位模型应用于短基线精密定位研究[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(1):56-61

[17] 王剑超,王志斌,李春杰,等. 北斗三号短基线四频组合定位方法研究[J]. 测绘工程,2022,31(6):40-46

（上接第42页）

[14] 许志华,吴立新,刘军,等. 顾及影像拓扑的SfM算法改进及其在灾场三维重建中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015,40(5):599-606

[15] 苗启广,史俊杰,刘天歌,等. 一种快速生成DSM的不规则三角网构网新方法[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(9): 1 868-1 873

[16] Zhang W, Qi J, Wan P, et al. An Easy-to-use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation[J]. Remote Sensing,2016,8(6):501-523

[17] 段园煜,郭帅,王秋萍,等. 道路雨水口泄流效率关键影响因素研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):7-12

[18] 高帅领,夏军强,董柏良,等. 雨水口泄流对城市洪涝影响的数学模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(3): 590-597

[19] 赵建坤. 平篦式雨水口的泄流能力及水动力特性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2021

[20] 姚飞骏. 雨水口的流量计算方法探讨[J]. 中国给水排水, 2013,29(14):45-48

[21] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护,2022,38(6):15-21