

# 基于北斗的相对位移测量方法在滑坡监测中的设计与实现

孙胜浩, 曹新亮, 吴佳辉

(延安大学 物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000)

**摘要:** 滑坡的相对位移测量是滑坡监测预警的重中之重, 针对测量中实时连续监测难、测量精度不稳定等问题, 采用了一种基于北斗导航定位数据的相对位移测量方法, 应用卡尔曼滤波平滑测量过程中的噪声保证数据稳定连续, 使用导航数据处理软件 RTKLIB 中的 RTKNAVI 工具对定位数据进行 RTK 处理提高定位精度, 解算出滑坡相对位移量; 并在所介绍测量方法的依据下设计了测量设备硬件平台, 对设备进行了模拟滑坡测量试验, 结果表明: 依据此方法优化设计的测量设备定位精度在水平方向精度为 5 mm, 垂直方向精度为 1.5 cm, 相对位移测量精度在 4 mm 内, 滑坡倾角测量精度达到 0.01°, 数据平均有效率为 96.97%, 测量过程稳定连续, 能够满足滑坡监测中的相对位移测量需要, 且该方法可以用来监测滑坡的单个和累积位移量, 将位移量与角度变化量相结合可以很好反映滑坡前兆与趋势, 为滑坡监测预警提供可靠判据。

**关键词:** 滑坡监测; 北斗; 相对位移测量; RTKLIB; RTK; 卡尔曼滤波

## Design and Implementation of Beidou-based Relative Displacement Measurement Method in Landslide Monitoring

SUN Shenghao, CAO Xinliang, WU Jiahui

(School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

**Abstract:** Relative seismic measurement of landslides is the top priority in landslide monitoring and early warning. In order to solve the problems of difficulty in real-time continuous monitoring and unstable measurement accuracy, a relative seismic measurement method based on Beidou navigation and positioning data is adopted, and Kalman-assisted smoothing is applied. The noise during the measurement process ensures that the data is stable and continuous. The RTKNAVI tool in the navigation data processing software RTKLIB is used to perform RTK processing on the positioning data to improve the positioning accuracy and calculate the relative displacement of the landslide. The measurement method is designed based on the introduction of the measurement method. Equipment hardware platform, a simulated landslide measurement test was conducted on the equipment. The results show that the positioning accuracy of the measurement equipment optimized using this method is 5 mm in the horizontal direction, 1.5 cm in the vertical direction, the relative bearing measurement accuracy is within 4 mm, and the landslide inclination angle measurement The accuracy reaches 0.01°, the average effective data meets 96.97%, and the measurement process is stable and continuous, which can meet the needs of relative seismic measurement in landslide monitoring. This method can be used to monitor the single and cumulative earthquake volume of landslides, and combine the seismic volume with the angle change. The combination can well reflect the precursors and trends of landslides and provide reliable judgment basis for landslide monitoring and early warning.

**Keywords:** landslide monitoring; Beidou; relative displacement measurement; RTKLIB; RTK; Kalman filtering

## 0 引言

以滑坡为主的地质自然灾害在我国具有分布区域广、灾害发生迅速、破坏性强的特点。大规模滑坡一旦发生, 会以极快的速度掩埋人员和房屋, 并有可能因为降雨和地势等原因演变成更具破坏力的泥石流<sup>[1]</sup>。因此对滑坡进行监测预警对防范地质灾害、保卫人民生命财产安全具有重

要意义。在发生滑坡的过程中会经历蠕动变形、急剧滑动阶段<sup>[2]</sup>。蠕动变形期是山体以缓慢、匀速的方式发生小量的沉降和滑动, 而急剧滑动期则是滑坡经蠕动变形后快速发生垮塌形变形成灾害的阶段<sup>[3-4]</sup>。因此, 对滑坡位移的监测主要针对山体的蠕动变形期, 以求对滑坡预警提供可靠判据。

在滑坡监测中, 对滑坡相对位移的测量是宏观把控滑

收稿日期: 2024-06-23; 修回日期: 2024-07-31。

基金项目: 国家自然科学基金(62141107); 研究生教育创新计划(YCX2024089)。

作者简介: 孙胜浩(1999-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 曹新亮(1970-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 孙胜浩, 曹新亮, 吴佳辉. 基于北斗的相对位移测量方法在滑坡监测中的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 57

坡情况的重要参量。传统的滑坡位移测量主要采用全站仪、水准仪等各种地表监测器和人工测量进行, 这些监测手段在实际使用中存在一定的弊端<sup>[5]</sup>。比如, 全站仪虽然是测量地质的主要手段, 但需要每年校准, 否则会极大地影响数据的精度, 这在一些偏远山区并不适用; 水准仪虽然精度较高, 但价格昂贵, 不利于大规模的使用推广; 人工测量虽能保证数据精度, 但严重降低数据时效性, 另外人工测量耗时耗力, 无法保证测量人员的安全。因此, 许多学者和研究人员将无线传感器、近景摄影、遥感等方法引入到滑坡位移测量中。文献 [6] 利用加速度传感器监测节点的运动状态, 对节点的三维矢量数据进行几何解算处理得出滑坡的位移量, 实现了对滑坡表面位移形变的监测。文献 [7] 则是采用磁定位对滑坡的内部形变进行了研究, 以相对差分方法消除背景磁场影响, 为滑坡深部形变监测提供了方法和理论指导。文献 [8] 通过摄影测量和图像识别技术对滑坡表面的三维位移进行监测。文献 [9] 结合 GNSS 和卫星 InSAR 遥感监测技术, 计算分析得出滑坡变形场的运动向量倾角变化规律, 以多种监测技术相结合的方式对滑坡变形运动趋势做出科学判断。

综上所述, 研究人员采用多种技术实现了滑坡相对位移量的测量, 但上述方法也存在一些不足之处。无线传感器在实际应用时容易受到地形和气象条件限制, 且外业工作量大, 测量周期长, 不能连续观测<sup>[10]</sup>。近景摄影在测量时对摄影设备专业要求过高, 无法广泛应用。遥感技术在测量区域应用时会受到天气条件、地形等因素干扰, 对测量数据的时效性和准确性产生影响<sup>[11]</sup>。因此, 本文结合我国北斗卫星导航系统的实时定位功能, 介绍了一种基于北斗的相对位移测量方法, 使用导航数据处理软件 RTKLIB 结合卡尔曼滤波进一步提升该方法的测量精度, 并应用于滑坡监测中, 全天候、全天时地监测坡面的相对位移量, 通过实地测量分析, 验证了该方法能够应用于滑坡监测预警中。

## 1 测量原理与方法

### 1.1 测量原理

实时动态相对定位技术 (RTK, real-time kinematic) 是一种利用 GNSS 信号进行高精度定位的技术, 通过测量来自至少 4 颗卫星的信号来计算地球上一个特定点的精确位置, 在测量的过程中需要设立至少一个基站和一个或多个移动站, 如图 1 所示。基站的位置已知并实时接收卫星信号, 计算出与每颗卫星之间的误差, 这些误差数据通过无线方式实时发送给移动站; 移动站承担着接收和处理卫星信号以及接收基站传输数据的任务<sup>[12]</sup>。通过结合自身接收到的卫星数据来修正本地测量值, 从而实现更高精度的定位。

当北斗接收机对卫星进行观测时, 其载波相位观测方程为:

$$\lambda\varphi = \rho + c \cdot dt - c \cdot dt^s - I + T + \lambda N + \epsilon \quad (1)$$

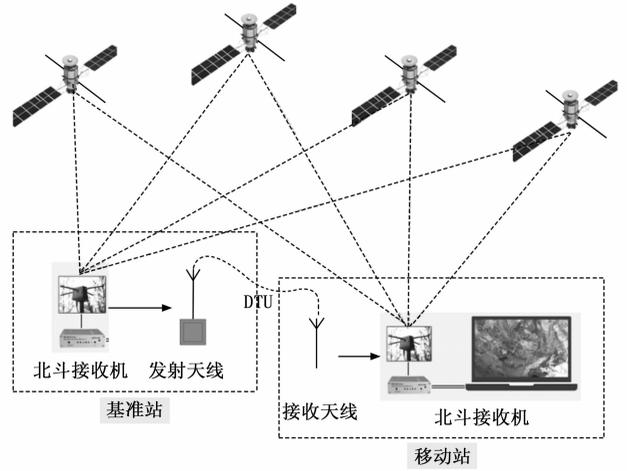


图 1 RTK 测量原理图

其中:  $\varphi$  为观测到的载波相位;  $\lambda$  为载波波长;  $\rho$  为从卫星到接收机的几何距离;  $dt$  为接收机钟差;  $dt^s$  为卫星钟差;  $I$  为电离层延迟;  $T$  为对流层延迟;  $N$  为整周相位模糊度;  $\epsilon$  为观测误差。为精确地计算由于接收机位置的微小变动所引起的距离变化, 引入方向余弦向量:

$$\Delta\rho = kV_x + mV_y + nV_z \quad (2)$$

式中,  $k, m, n$  分别为接收机的坐标方向余弦,  $V_x, V_y, V_z$  为接收机到卫星的方向向量。双差可以消除卫星钟差  $dt^s$ 、接收机钟差以及多路径效应的影响, 并且在超短基线的情况下, 电离层延迟  $I$  和对流层延迟  $T$  可以忽略<sup>[13]</sup>。设有基准站  $r$ 、移动站  $m$  以及在相同历元下的观测卫星  $i, j$ , 则双差观测方程为:

$$\Delta\Delta\varphi_{rm}^i = \lambda^{-1}(\rho_{rm}^i + \Delta\rho_{rm}^i) + N_{rm}^i + \epsilon_{rm}^i \quad (3)$$

当两个接收机在同一时刻同时观测  $n$  颗卫星, 则可以得到  $n$  个观测方程, 将这些方程两两做差可得  $n-1$  个相互独立的方程, 以差分方向余弦构成矩阵  $A$ , 双差载波观测向量构成矩阵  $b$ , 使用最小二乘法求解  $\Delta x$ :

$$\Delta x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

通过不断迭代, 对载波相位进行周跳探测与修复, 并固定整周模糊度, 可以精确解算出接收机在大地坐标系下的经度、纬度和高程数据。在得到精确的位置数据后, 需将大地坐标转换成本地东北天顶 (ENU, east north up) 坐标才能进行相对位移量的解算。

假设 RTK 解算得到基准站  $r$  的大地坐标为  $(\lambda_r, \xi_r, h_r)$ , 移动站  $m$  在测量时刻  $t_1$  和  $t_2$  的大地坐标分别为  $(\lambda_1, \xi_1, h_1)$  和  $(\lambda_2, \xi_2, h_2)$ 。首先将大地坐标转换为地心地固 (ECEF, earth-centered earth-fixed) 坐标  $(X, Y, Z)$ , 以便进行 ENU 坐标转换, 通用转换公式为:

$$\begin{cases} X = [N(\xi) + h] \cos\xi \cos\lambda \\ Y = [N(\xi) + h] \cos\xi \sin\lambda \\ Z = [N(\xi)(1 - e^2) + h] \sin\xi \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $N(\xi)$  是纬度  $\xi$  处的卯酉圈曲率半径, 在地球椭球

模型下将大地坐标转换为 ECEF 坐标, 转换后的基准站  $r$  和移动站  $m$  在时刻  $t_1$  和  $t_2$  的 ECEF 坐标分别为  $(X_r, Y_r, Z_r)$ 、 $(X_1, Y_1, Z_1)$  和  $(X_2, Y_2, Z_2)$ 。选取移动站  $t_1$  时刻的 ECEF 坐标, 计算  $t_1$  时刻移动站相对基准站的差值:

$$\begin{cases} \Delta X_1 = X_1 - X_r \\ \Delta Y_1 = Y_1 - Y_r \\ \Delta Z_1 = Z_1 - Z_r \end{cases} \quad (6)$$

利用基准站的大地坐标构成转换矩阵将  $t_1$  时刻移动站的 ECEF 坐标差值转换为 ENU 坐标:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ N_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_r & \cos\lambda_r & 0 \\ -\sin\xi_r \cos\lambda_r & -\sin\xi_r \sin\lambda_r & \cos\xi_r \\ \cos\xi_r \cos\lambda_r & \cos\xi_r \sin\lambda_r & \sin\xi_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Z_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

同理, 由式 (6) (7) 可得  $t_2$  时刻移动站的 ENU 坐标  $(E_2, N_2, U_2)$ , 将两个时刻的 ENU 坐标做差:

$$\begin{cases} \Delta E = E_2 - E_1 \\ \Delta N = N_2 - N_1 \\ \Delta U = U_2 - U_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, 得到的  $\Delta E$ 、 $\Delta N$ 、 $\Delta U$  分别为移动站在东、北、天 3 个方向上的位移, 使用欧几里得距离公式可算出滑坡监测中坡体的实际相对位移量  $\Delta d$ , 由下式:

$$\Delta d = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2 + \Delta U^2} \quad (9)$$

为了确保测量的连续性, 使用卡尔曼滤波减少较短时间间隔内观测数据噪声影响。卡尔曼滤波是一种递归算法, 通过结合观测值和预测值来估计系统状态, 平滑和优化测量数据, 保证测量过程稳定连续<sup>[14-16]</sup>。

在测量过程的某一时刻  $k$  下, 定义状态向量  $\mathbf{X}_k$  包含移动站的位置信息  $(E, N, U)$  和速度信息  $(\dot{E}, \dot{N}, \dot{U})$ ; 观测向量  $\mathbf{Z}_k$  仅包含移动站的位置信息  $(E, N, U)$ ; 在测量开始时定义初始状态向量  $\mathbf{X}_0$ , 初始协方差矩阵  $\mathbf{P}_0$ , 用来表示移动站测量初始状态的不确定性。假设连续测量时间间隔为  $\Delta t$ , 状态转移矩阵  $\mathbf{B}$  和过程噪声协方差矩阵  $\mathbf{Q}$  为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_q^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_q^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_q^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_q^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_q^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_q^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: 状态转移矩阵  $\mathbf{B}$  描述移动站在时间间隔  $\Delta t$  内的状态变化, 矩阵  $\mathbf{Q}$  描述测量过程中的随机噪声, 对角线元素  $\sigma_q^2$  表示过程噪声的方差。

通过状态转移矩阵  $\mathbf{B}$  可进行状态预测和协方差预测,

如下式:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k|k-1} = \mathbf{B}\mathbf{X}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{B}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{B}^T + \mathbf{Q} \end{cases} \quad (11)$$

在连续测量过程中有新的观测值时, 需要使用新观测值来更新预测的状态和协方差。定义观测矩阵  $\mathbf{H}$  和观测噪声协方差矩阵  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: 观测矩阵  $\mathbf{H}$  将状态向量  $\mathbf{X}_k$  映射到观测空间, 矩阵  $\mathbf{R}$  的对角线元素  $\sigma_r^2$  表示观测噪声的方差, 反应观测过程中的噪声特性。为平衡预测和测量的不确定性, 确定预测值和观测值在更新中的权重, 定义卡尔曼增益  $\mathbf{K}_k$ , 其计算公式如下:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (13)$$

则状态和协方差更新公式为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k|k} = \mathbf{X}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\mathbf{X}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k|k-1} \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $\mathbf{X}_{k|k-1}$  为预测的状态向量;  $\mathbf{Z}_k$  为当前观测向量;  $\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\mathbf{X}_{k|k-1}$  为卫星观测误差量;  $\mathbf{K}_k\mathbf{H}$  为卡尔曼增益和观测矩阵的乘积;  $\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}$  为修正因子, 用于调整预测协方差。由此可获得更新后的状态估计和预测协方差, 输出经过滤波优化后的当前时间点的相对位移量  $\Delta d$ 。

通过以上步骤, 卡尔曼滤波能够在连续时间点上结合精确观测数据和解算信息递归地估计移动站的最优状态, 包括位置和速度, 并通过预测和更新不断修正误差, 在线性时间下提供稳定精确的位移测量结果。

## 1.2 RTKLIB

RTKLIB 是日本东京海洋大学开发的用于 GNSS 精密定位的开源程序包, 目前最新版本为 2.4.3, 官网已停止了更新, 托管在 GitHub 网站上<sup>[17-19]</sup>。RTKLIB 支持多种 GNSS 数据格式, 包括 GPS、GLONASS、Galileo、QZSS、BeiDou 和 SBAS, 这使得它能够在全球范围内广泛使用, 其包含多个使用工具和应用程序<sup>[20]</sup>。具体的工具和功能如表 1 所示。

表 1 RTKLIB 的工具及功能

工具	功能
RTKNAVI	实时导航和定位
RTKPOST	后处理定位
RTKCONV	原始数据转换工具
STRSVR	串行数据流服务器
RTKPLOT	数据可视化工具
RTKGET	下载 GNSS 数据文件
RTKRCV	命令行版实时定位服务器
RTKLIB QT	基于 QT 的 GUI 应用程序集

使用 RTKLIB 进行数据处理的技术路线为: 使用 STRSVR 和 RTKCONV 工具对基准站和移动站的定位数据

进行实时接收并转换为 RTKLIB 能够处理的 RINEX 格式，将基准站的精确定位数据转换为差分观测数据文件，使用 RTKNAVI 工具结合卡尔曼滤波对双站的观测数据进行 RTK 和相对位移量解算，获得滑坡的相对位移数据。

### 1.3 测量方法

为实现动态化、全方位地监测滑坡位移量，获取滑坡的实时动态信息，结合基于北斗的相对位移测量手段构建了适用于滑坡监测的测量方法，具体的方法流程如下：

1) 在滑坡监测区域设立内置北斗定位模块的基准站和移动站，其中移动站配备角度传感器。双站之间通过无线终端设备 (DTU, data transfer unit) 建立数据链路，将采集到的实时定位数据和角度数据传输给数据解算中心。

2) 使用 RTKLIB 对北斗原始定位数据进行 RTK 解算，提升定位精度。

3) 将 RTK 解算后的精确大地坐标经过两次坐标转换为 ENU 坐标并计算出滑坡相对位移量，使用卡尔曼滤波对解算过程进行去噪处理，满足滑坡监测的定位需求并获得连续稳定的滑坡实时位移量。测量方法中的总体数据处理路线如图 2 所示。

## 2 硬件设备选型与设计

### 2.1 硬件设备选型

该方法在滑坡监测中的实现所用的硬件设备由北斗定位模块、通信模块、角度传感器模块和数据处理模块组成。其中，北斗定位模块选用合宙公司的 Air780EG 双模定位模组，此模块为 Cat.1+GNSS 二合一，支持北斗二号/三号卫星、NMEA4.1 协议、功耗低、联网快、信号好，可灵活应用于户外定位、资产管理、人员位置管理等应用需求。通信模块采用主从一体的 HC-05 蓝牙串行通信模块，分为主模块和从模块，可相互配对进行数据双向通信，主从模块之间的有效通信距离半径为 30 m，通信状况极佳。角度传感器模块选用 MPU6050 整合性 6 轴运动处理组件，该组件的角速度全格感测范围为 ±250、±500、±1 000 与 ±2 000°/sec (dps)，可准确追踪快速与慢速动作，灵敏度较高。数据处理模块采用意法半导体公司 STM32F103C8T6

型单片机，该单片机基于 ARM Cortex-M3 处理器核的 32 位微控制器，主频 72 MHz，128 kB 闪存、20 kB 的 RAM，工作电压 3.3 V 专为微控制器系统、工业控制系统等领域设计，数据处理能力强。符合滑坡监测的具体需求。

因滑坡相对位移测量中对于定位模块的卫星观测数据质量要求较高。为分析定位模块的观测数据质量，使用合宙公司开发的 iNavTool\_R4.0.1 软件对模块卫星观测数据进行处理。图 3 为该软件按照接收的模块定位数据分析生成的北斗卫星接收信号界面，能够实时的显示出此时的位置信息和各个卫星的相对关系以及信号质量。界面左上角是卫星天空图，显示了当前可见的 GPS/BDS 卫星以及它们在天空中的位置；中间是卫星信号强度指示器，每个条形代表一个卫星的信号强度，分别可以呈现 GPS、BDS、Galileo 以及 GLINASS 四个卫星导航系统的接收卫星信息，由上图可见定位模块当前接收的 GPS 六颗卫星和 BDS 四颗卫星的编号及信号强度，这表明当前卫星信号良好，能够进行实时定位；左下角是一个文本框，显示了从卫星接收到的为 NMEA 通用格式的原始数据，其中“GNGGA...”为具体的导航信息，可用来解算以实现定位；右上角面板显示了经过软件分析解算后的实时导航数据，包括当前时间 (UTC)、经度 (Lon)、纬度 (Lat)、高度、速度 (Spd) 和航向 (cog)，还显示了当前定位模式和使用的卫星数量；右下角是一个集成百度地图 API 显示当前位置的地图，能够直观显示出当前定位的位置情况。

通过 iNavTool\_R4.0.1 软件的数据分析，模块可捕获卫星数量为 10~14 颗，卫星质量极佳，且捕获的卫星均为稳定跟踪状态，能够有效完成实时定位。

设备运行的主要路线为：前端测量设备 (移动站) 利用无线传输模块将测量点的实时定位数据、角度数据等传输给系统平台 (基准站)，基准站配备有北斗定位模块、无线通信模块和单片机，单片机内嵌有 RTKLIB 短基线 RTK 解算程序和卡尔曼滤波算法，能够实时接收并稳定连续解算基准站和移动站的定位数据和角度数据。

### 2.2 移动站硬件设计

移动站主要的功能为：接收基准站的观测数据、采集

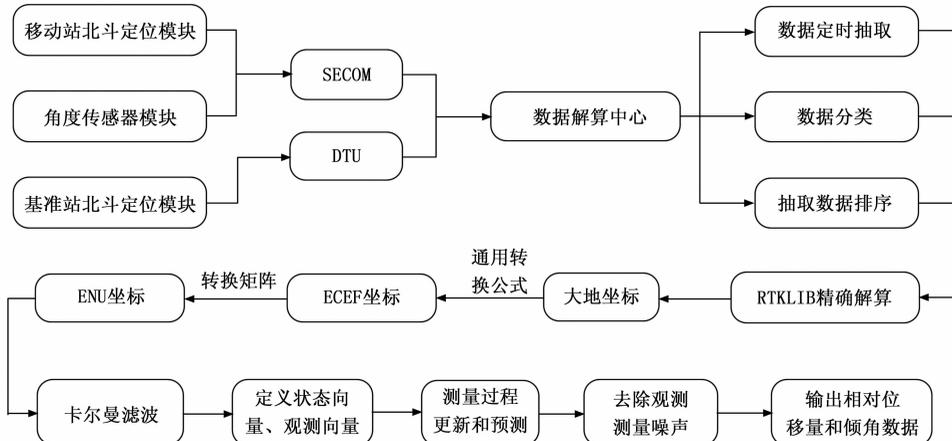


图 2 总体数据处理路线示意图



图 3 北斗卫星接收信号示意图

角度数据以及解算得出滑坡相对位移量和倾角, 由此移动站的硬件设计思路为: 将 MPU6050 模块的 SDA 和 SCL 引脚分别连接到 STM32 单片机的 I2C1\_SDA 和 I2C1\_SCL 端口, 同步时钟信号进行数据传输。遵循 I2C 通信协议将 MPU6050 模块的角度动量数据传输给单片机, 经姿态解算后在 OLED 显示屏显示。HC-05 蓝牙主模块通过 AT 命令与 HC-05 蓝牙从模块进行配对, 配对完成并成功识别后, 负责与基准站进行无线通信并通过串口通信的方式将数据传输给 STM32 单片机。之后将 Air780EG 模块的 MAIN\_TXD 和 MAIN\_RXD 端口分别连接到单片机的 RXD 和 TXD 引脚, 设计了串口电压转换电路, 用以定位模块匹配 3.3 V 电平的外接串口, 采用 AGPIO3, D2 选低导通压降的肖特基二极管, 因定位模块波特率为 115 200, 故无需外加电平转换芯片来实现电压转换。具体的电路连接方式如图 4、5 所示。

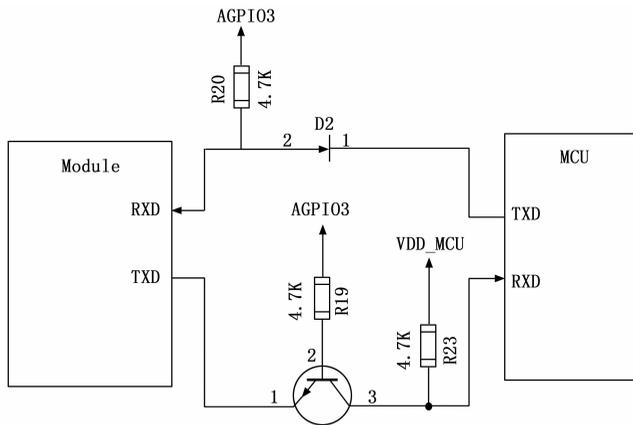


图 5 定位模块串口电压转换电路图

### 2.3 基准站硬件设计

基准站的功能为: 接收原始定位数据, 通过单片机运算得出观测数据和导航数据并发送给移动站。因此基准站的硬件设计思路为: Air780EG 定位模块通过串口通信方式将实时定位数据传输给单片机, 单片机同样以串口通信方式将运算后的观测数据传输给 HC-05 主蓝牙模块, 随后蓝牙主模块将观测数据发送给移动站的 HC-05 蓝牙从模块。最后在双站都加入了按键与复位电路, 方便进行定时测量和故障排查, 电路设计如图 6 所示。

### 2.4 电源设计

在搭建的基准站与移动站测量硬件中, STM32F103C8T6 单片机的工作电压为 2.0~3.6 V、MPU6050 模块的工作电压为 3.3~5 V、HC-05 主从蓝牙模块的工作电压为 3.3~6 V、Air780EG 定位模块的工作电压为 5 V, 其中定位模块支持 USB 5 V 直接供电。为保证其他模块能够正常工作, 采用 RT9013-33GB 线性稳压器设计了如图 7 所示的电源供电电路, 用于将输入电压调节为稳定的输出电压 3.3 V, 确保电路中各模块的稳定运行。

## 3 测量设备软件设计

### 3.1 基准站软件设计

本文使用开源导航数据处理程序包 RTKLIB 中的 STRSVR 工具将定位数据转换成 RTKLIB 可处理的 RINEX 通用数据格式, 在观测时间序列下使用 RTKCONV 工具将基准站导航观测数据打包为 .nav 导航文件和 .obs 观测值文件, 并调用卡尔曼滤波子程序对基准站观测过程去噪。最后以观测开始时间为起点, 按照 1 s 的时间间隔为导航和观测文件增加时间标签并排序, 按顺序通过无线通信方式将差分观测数据发送给移动站。

### 3.2 移动站软件设计

移动站主要进行数据接收和处理工作。在上电启动各模块初始化后, 当接收到基准站无线通信终端传来的数据后, 检查 STM32 的通信串口是否接收到移动站各模块的数据, 使用串口函数对接收到的基准站差分观测数据、移动站定位数据和角度数据进行分类并按照时间排序, 使用

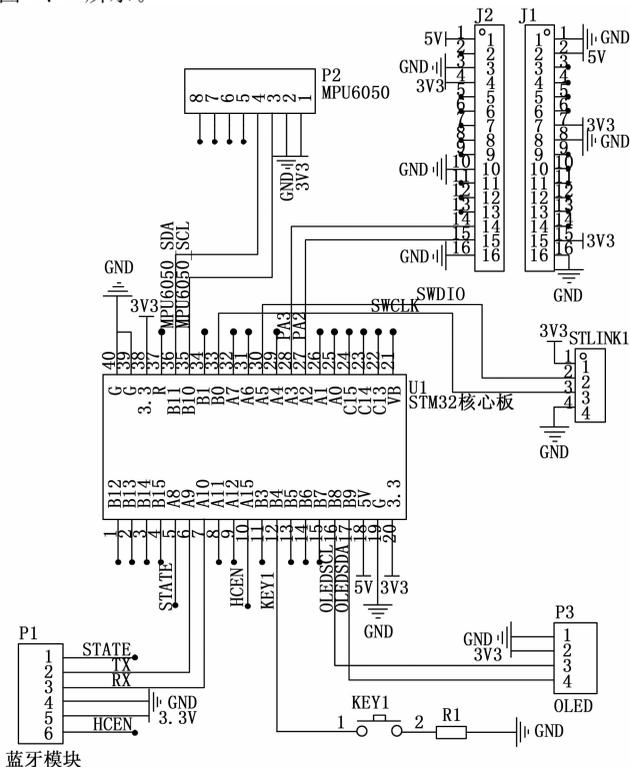


图 4 移动站硬件设计图

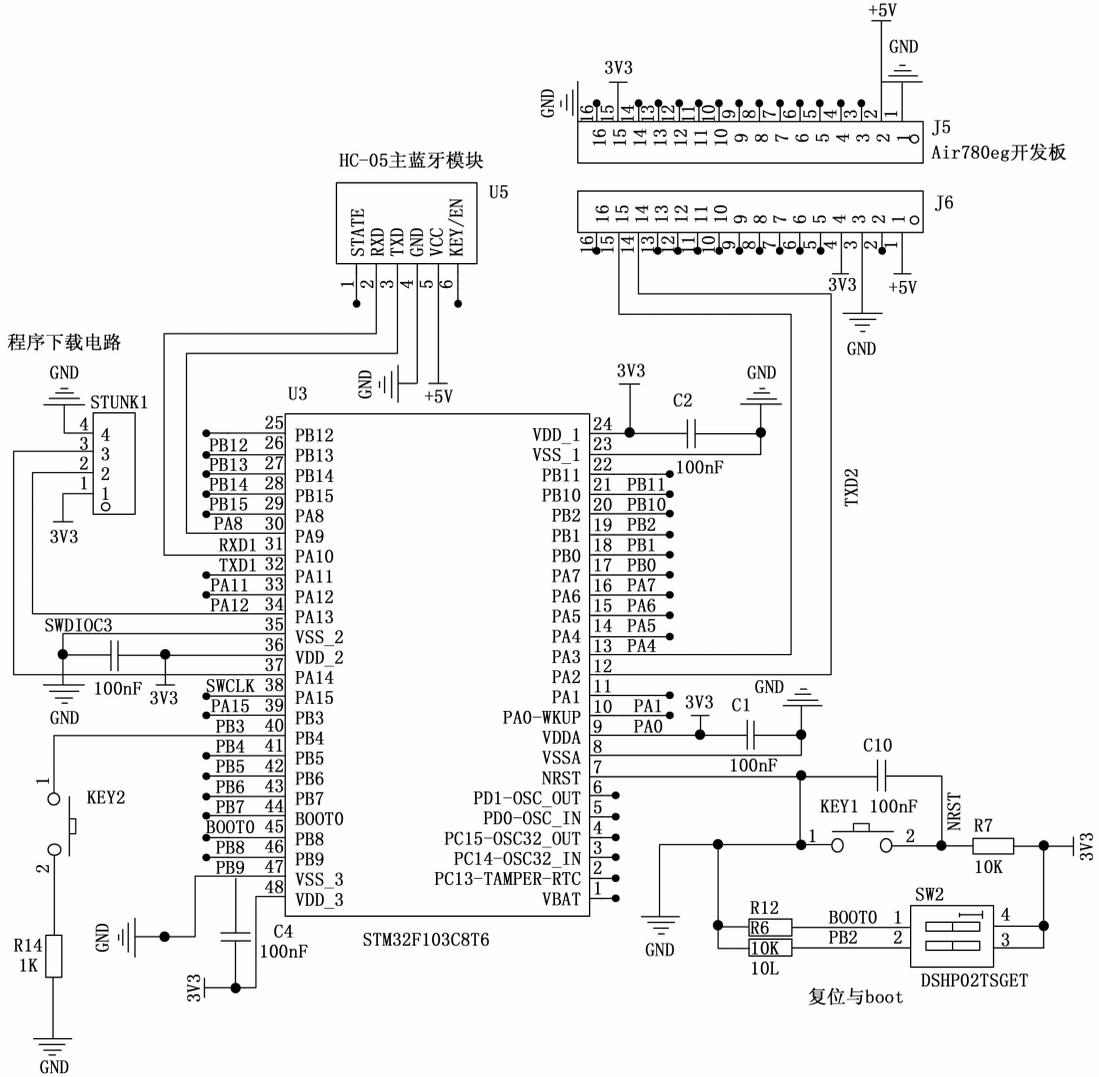


图 6 基准站硬件设计图

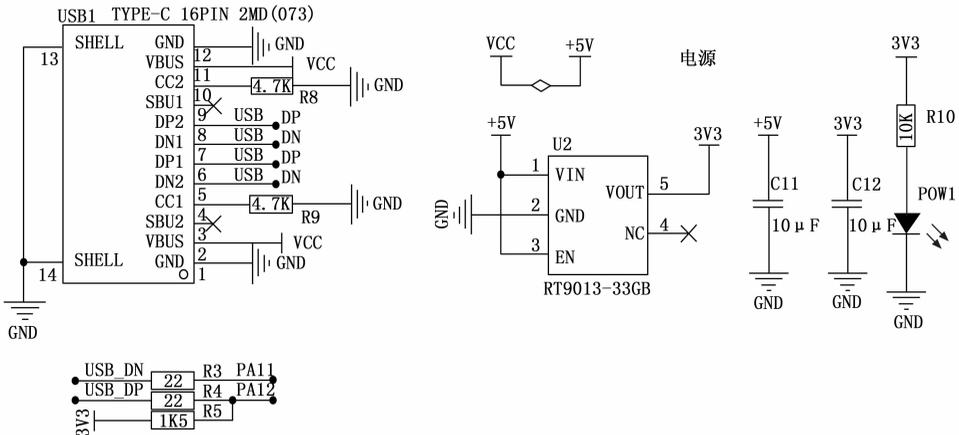


图 7 电源模块设计

DMA 和中断检查数据接收的完整性。在确定数据接收完整  
后对数据进行解析处理，使用 STRSVR 工具将移动站定位  
数据转换成 RINEX 格式并调用卡尔曼滤波程序去除噪

声。随后将角度数据以数组的形式暂存至 STM32 内置的  
Flash 存储空间中，同时将移动站定位数据和基准站差分观  
测数据导入 RTKNAVI 程序中进行 RTK 精确解算，对

RTK 解算得出的精确大地坐标经过通用格式转换为 ENU 坐标格式以进行相对位移量的计算, 最后读取数据, 输出相对位移量和角度数据。移动站软件设计流程如图 8 所示。

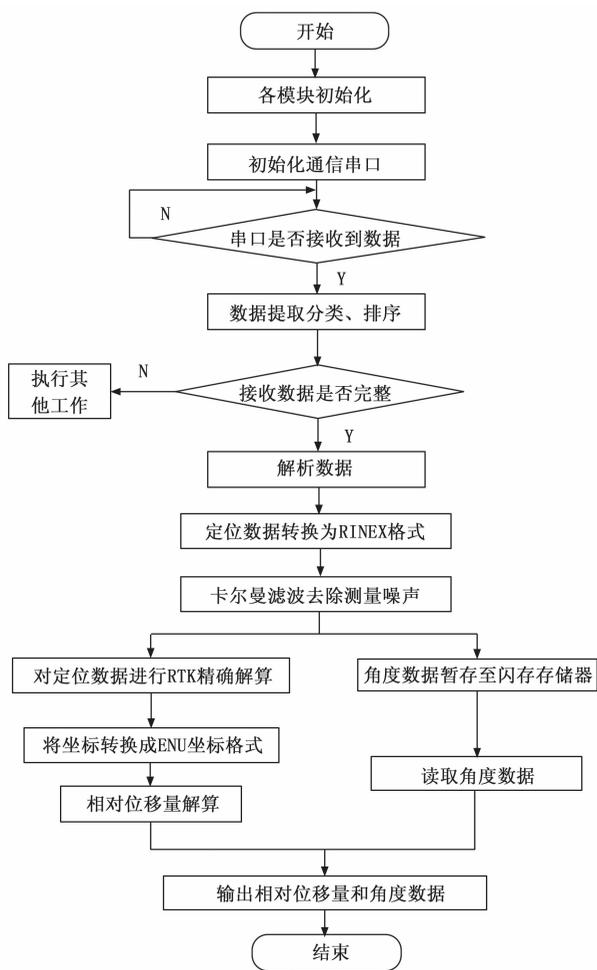


图 8 移动站软件设计流程图

#### 4 测量方法在滑坡监测中的实现与分析

为保证测试环境真实性, 本文选取 3 处坡面作为待监测滑坡体, 将移动测量设备 (移动站) 设立在坡体的监测点上, 固定基准设备 (基准站) 设立在开阔且地质稳定的地点, 设置导轨用以测量设备的移动, 模拟滑坡缓慢蠕动变形的过程, 同时采用人工法全站仪以 3 min/次的频次进行复核, 所用全站仪精度为 2 mm。每个坡面具体的测量要素如表 2 所示。

表 2 测量要素

测量内容	测量项目	测量方式	测量目的	数量
地表位移	相对位移	北斗	测量地表位移, 变形发展情况	3 个监测点 + 1 个基准站
角度	角度变化量	角度传感器	观测区域坡体随地表位移的角度变化情况, 辅助分析滑坡稳定性	1 个

#### 4.1 监测点布设

1 号坡体为陡峭斜坡, 坡度在 20~30°之间, 坡长 60 m, 坡高 6.5 m, 土壤成分主要为砂质土和黏土, 坡面有植被较少。在坡体的凸起处、凹陷处以及植被稀疏处设立移动监测点, 在坡体上方岩土稳定性强且开阔无遮挡的区域放置基准站, 如图 9 所示。



图 9 1 号坡体监测点布设图

2 号坡体坡长 45 m, 坡高 8 m, 总体坡度在 15~20°之间, 坡面倾斜呈东南方向, 倾斜程度分布均匀且有较多植被。在坡面的中上区域放置 3 个移动监测点, 监测点彼此位置呈三角形结构, 能够较为全面测量滑坡的状态, 如图 10 所示。



图 10 2 号坡体监测点布设图

3 号坡体坡长 104 m, 坡高 7.5 m, 坡度在 25~30°之间, 较为陡峭, 坡体呈现出分层的梯田状结构, 每层 1.5 m, 植被丰富。根据坡面梯田分层结构在坡面上放置的 3 个移动监测点, 在坡体上方的稳定控制点设立基准站, 如图 11 所示。



图 11 3 号坡体监测点布设图

### 4.2 定位精度测试分析

实测中分别对普通单点定位、经 RTK 和卡尔曼滤波处理后的定位使用开源导航处理软件 RTKLIB 中的定位数据处理工具 RTKNAVI 对测量设备实时卫星观测数据流进行分析, 实测时间 50 min。图 12 为实测普通单点定位的  $E$ 、 $N$ 、 $U$  精度图, 由图可知在实测过程中, 水平方向和垂直方向的定位精度分别是 2.1 m 和 3.2 m, 且在定位过程中出现了 4 次跳变, 最大跳变精度变化 0.5 m, 跳变精度差异较大, 定位连续性 97.6%, 定位精度和连续性还需进一步改进。

图 13 为进行实时 RTK、卡尔曼滤波解算后的  $E$ 、 $N$ 、 $U$  精度图, 因在实际测量中所设置的基准站位于距测量区域较近的的稳定控制点, 精确坐标已知, 移动站位于测量区

域位置中心点, 基线长度为 10 m, 故在 10 m 基线下进行观测。在超短基线下, 定位收敛时间为 90 s, 固定后的水平方向的定位精度在 5 mm 内, 垂直方向的定位精度在 1.5 cm 内, 总体固定率为 98.2%,  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向的 RMS 值分别为 4.7、7.1、14.9 cm, 定位过程中无跳变情况, 数据解算连续稳定, 能够满足滑坡位移测量的要求。

### 4.3 滑坡相对位移测量结果分析

在将设备放置到指定地点并对设备各模块进行上电调试后, 即开始进行滑坡相对位移自动测量, 有效测量时间为 60 min, 在此过程中按照滑坡发生的理论移动特性人工移动测量设备获取实时连续的测值并将设备获得的测值与人工测量值进行比较, 以验证设备在实地测量的精度。

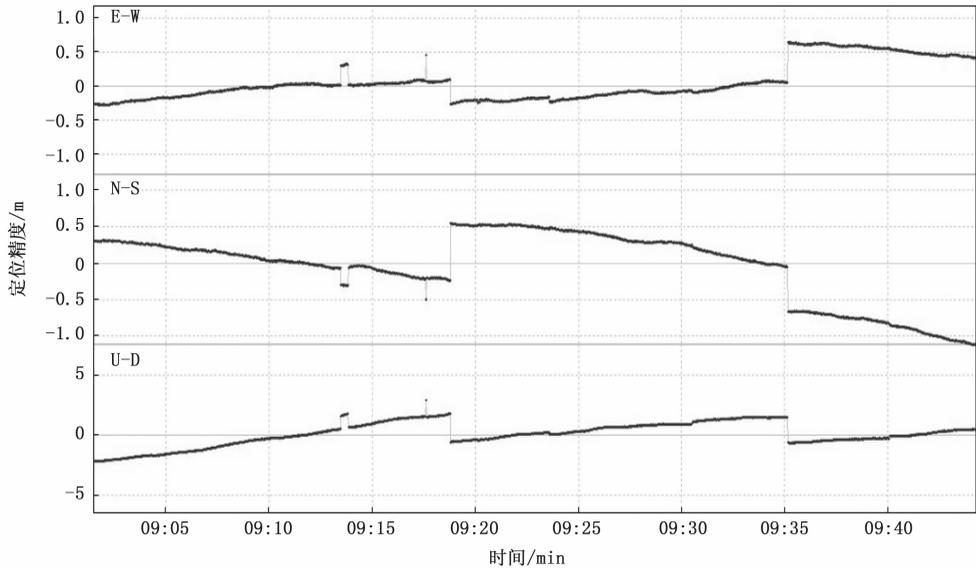


图 12 普通单点定位精度图

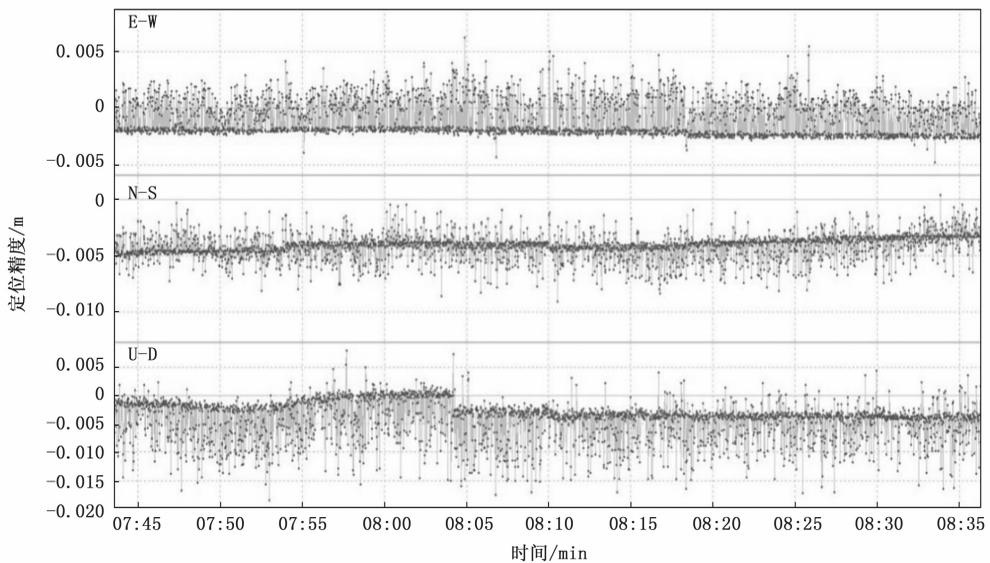


图 13 RTK、卡尔曼滤波解算后的定位精度图

表 3 为 60 min 时间序列下设备以普通单点定位、经 RTK 和卡尔曼滤波精确解算的方法自动测量 1 号坡体相对位移量和倾角以及人工测得的位移量。

表 3 1 号坡体测量结果

时间 /min	人工测相对位移量/cm	普通单点定位测相对位移量	精确解算处理后测相对位移量/cm	角度 /( $^{\circ}$ )
0	7	9	6.5	0
3	6	8.3	6.8	0
6	8	10.6	7.7	0.2
9	9	12.4	9.4	0.3
12	11	12.3	10.5	0.5
15	13	15	13.3	1
18	14	11.6	14.5	1.4
21	12	9.4	12.6	1.8
24	12	12.2	12.4	2.4
27	15	15.9	15.3	3.1
30	18	15.4	18.7	4.04
33	20	21.6	19.8	4.1
36	25	24.6	25	4.12
39	28	27.3	27.9	4.15
42	29	32.7	29.5	4.2
45	30	34.7	30.7	5.1
48	30	28	30.2	5.25
51	33	35	33.5	5.3
54	34	31.4	34.1	5.4
57	35	34.1	35.3	5.6
60	36	34.6	36.2	6

3 处坡体相对位移测量结果如图 14 所示, 其中, 1 号坡体的人工测量滑坡相对位移量为 36 cm, 以人工测量结果为参考, 普通单点定位下的滑坡相对位移量最大偏差为 4.7 cm, 在连续测量中结果波动较大, 随着定位精度跳变数据存在漂移现象; 经 RTK 和卡尔曼滤波实时精确解算后的相对位移量最大偏差 8 mm, 整体偏差保持在  $\pm 2.5$  mm 范围内, 数据有效测量概率为 94%, 测量结果稳定连续。2 号坡体人工测量滑坡相对位移量为 30 cm, 普通单点定位下的相对位移测量结果最大偏差 3 cm, 数据漂移现象相较于人工测量结果依然存在; 精确解算后的测量结果最大偏差 5 mm, 整体偏差保持在  $\pm 2$  mm 范围内, 数据有效测量概率为 98.3%, 测量结果与人工测量结果较为吻合, 偏差量在容错区间内。3 号坡体人工测量滑坡相对位移量为 27 cm, 普通单点定位下的测量结果最大偏差 5.1 cm, 在测量中的 30~45 min 内数据漂移现象尤为严重, 测量结果相较于人工测量偏差较大; 精确解算后的测量结果最大偏差 4 mm, 整体偏差保持在  $\pm 2.3$  mm 范围内, 数据有效测量概率 98.6%。

图 15 为测量设备在 3 处坡体模拟滑坡蠕动变形过程中的倾角变化情况, 由图可知, 1 号坡体测量最大倾角为  $6^{\circ}$ , 2 号坡体最大倾角  $5.4^{\circ}$ , 3 号坡体最大倾角  $5^{\circ}$ 。在 3 处坡体的倾角测量过程中对设备的倾角测量功能进行了稳定连续测

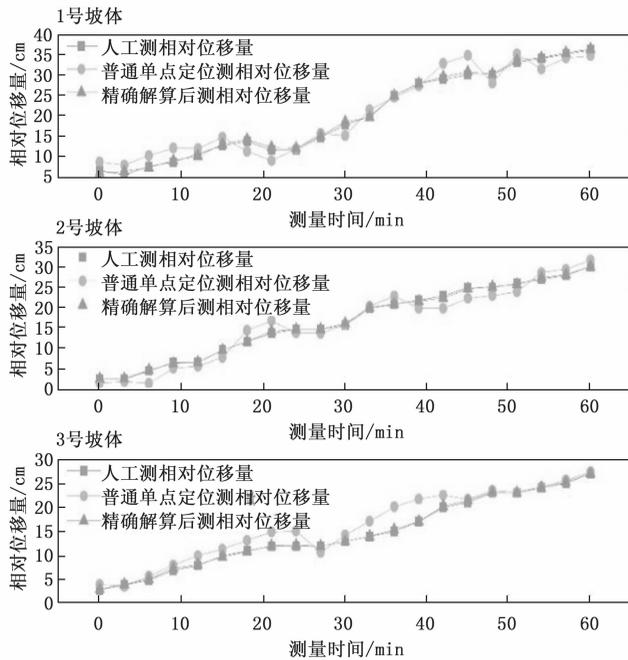


图 14 三处坡体两种自动测量法与人工法相对位移测量结果对比图

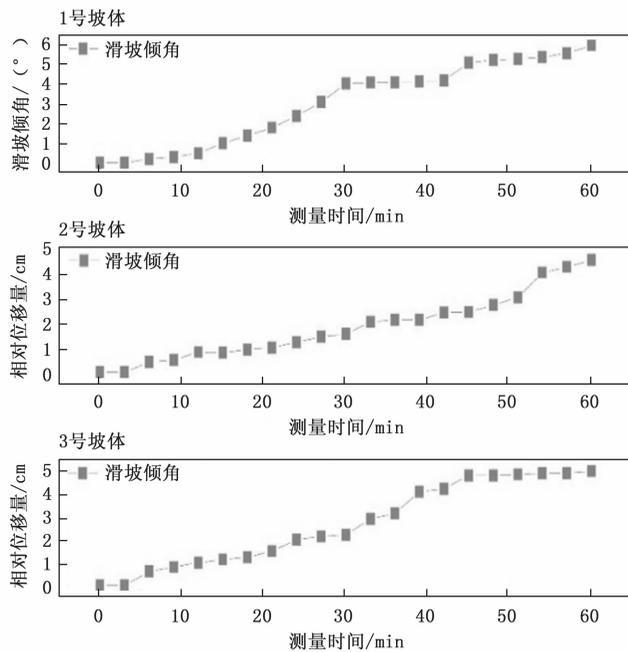


图 15 三处坡体倾角测量结果图

试, 结果显示设备能够以  $\pm 2000^{\circ}/s$  (dps) 的速率追踪滑坡倾斜姿态, 解算角度可精确至  $0.01^{\circ}$ , 有较好的连续性。

### 5 结束语

在本研究中, 详细阐述了北斗 RTK 定位技术和卡尔曼滤波的基本原理以及 RTKLIB 软件, 介绍了一种基于北斗的滑坡相对位移测量方法, 通过 RTK 精确解算和卡尔曼滤波处理对定位数据的稳定性和精确性进行了改进, 根据测

量实际需要搭建了硬件设备。为了进一步验证该测量方法的精度和稳定性,选取了 3 处坡体开展了模拟滑坡测量试验。通过实地测量发现,经过改进的相对位移测量方法精度明显优于普通单点定位测量,测量结果稳定连续,设备的倾角测量功能能够与相对位移测量结果相结合,能够全天候、全天时地反映滑坡前兆及趋势,应用到滑坡灾害监测领域中。

因所选测量区域与基准站实际控制点相隔较近,故本文所选用的是短距离数传终端模块。然而在实际应用中,待测量滑坡区域与稳定控制点往往较远,对数据的实时传输提出了更高要求。在后续研究中将重点解决无公网环境下的远距离数据传输、数据更新、震动干扰等问题。

#### 参考文献:

- [1] 韦忠跟. 蒙东地区软岩边坡蠕变变形及滑坡规律研究 [J]. 露天采矿技术, 2022, 37 (2): 8-11.
- [2] 肖婷, 刘庆丽, 邓敏, 等. 三峡库区万州区滑坡易发性演化规律 [J/OL]. 地球科学, 2024; 1-19. [2024-05-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240506.1400.004.html>.
- [3] 孙晶莹, 李绍民, 吕明帅, 等. 基于 TC264 单片机的山体滑坡预警系统设计 [J]. 山西电子技术, 2023 (5): 4-6.
- [4] 张迁. 滑坡地质灾害勘查及治理技术分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (6): 216-218.
- [5] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考 [J]. 工程地质学报, 2020, 28 (2): 360-374.
- [6] 赵增群, 王楷, 秦伟, 等. 基于加速度传感器 MMA8452 的滑坡位移监测系统的设计 [J]. 电子技术, 2017, 46 (4): 63-66.
- [7] 何云飞, 吴剑, 汪超盛, 等. 滑坡深层位移磁定位测量方法研究 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2019, 41 (2): 55-58.
- [8] 刘崑, 周建新, 辛旺, 等. 摄影测量与图像识别在滑坡位移监测中的应用 [J]. 南华大学学报 (自然科学版), 2023, 37 (2): 7-17.
- [9] CARLÀ T, TOFANI V, LOMBARDI L, et al. Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment [J]. Geomorphology, 2019, 335: 62-75.
- [10] 毕京学, 郭英, 杨凯. GPS RTK 测量过程及应用问题 [J]. 全球定位系统, 2013, 38 (3): 65-68.
- [11] 付晨, 郭润志, 王建西. GNSS 技术在地质灾害安全监测预警系统中的应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (6): 151-154.
- [12] 李亚宏, 王永威, 马怀玉. GPS 测量在工程测量中的应用与发展 [J]. 建筑技术, 2023, 54 (24): 3020-3022.
- [13] 曹士龙, 蔚保国, 伍蔡伦, 等. 广义阻尼 LAMBDA 方法及其在长基线实时定位中的应用 [J]. 全球定位系统, 2023, 48 (4): 69-74.
- [14] 王鹏, 王大为, 何晶晶. 误差状态卡尔曼滤波的视觉惯性自适应融合定位方法研究 [J]. 航空科学技术, 2024, 35 (4): 104-111.
- [15] 罗新灿, 王茂松, 崔加瑞, 等. 基于状态变换卡尔曼滤波的无人机/无人车跨域协同导航 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31 (12): 1189-1195.
- [16] 张胜威, 贺凯飞, 杨金权, 等. 一种改进的自适应卡尔曼滤波组合导航算法 [J]. 测绘科学, 2023, 48 (11): 29-38.
- [17] 杨震, 顾和和, 孟昊霆. 几种开源精密单点定位软件算法研究与精度分析 [J]. 测绘地理信息, 2021, 46 (6): 31-35.
- [18] 方明祥, 章俊, 张清波, 等. 基于 RTKLIB 实时差分定位的 BDS 性能研究 [J]. 北京测绘, 2022, 36 (12): 1763-1768.
- [19] 邹进贵, 程志新, 张小溪. RTKLIB 支持下的基线相对定位研究 [J]. 测绘通报, 2022 (s2): 11-14.
- [20] 丁鑫, 陶庭叶, 陶征广, 等. RTKLIB 软件结构及调用方法 [J]. 导航定位学报, 2020, 8 (4): 93-99.
- [10] 韩煜, 张义民, 张凯, 等. Adam 优化 CNN 的滚动轴承多故障耦合诊断方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2022 (8): 169-172.
- [11] 王秀芳, 孙双, 丁春阳. 基于 1D-RSCNN 的嵌入式轴承故障实时检测 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2022, 52 (2): 310-317.
- [12] 宋向金, 赵文祥. 交流电机信号特征分析的滚动轴承故障诊断方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (4): 1582-1596.
- [13] 康守强, 刘旺辉, 王玉静, 等. 基于深度在线迁移的变负载下滚动轴承故障诊断方法 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (6): 1521-1530.
- [14] 张蓝宁, 马金奎, 陈淑江. 基于 EHNH 与 PSO-MOMEDA 的轴承故障诊断 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (3): 76-79.
- [15] 孙鑫威, 纪爱敏, 杜占涛, 等. 动车组齿轮箱滚动轴承变速故障诊断方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55 (1): 106-115.
- [16] 刘华杰, 雷文平, 王军辉, 等. 基于深度动态密度估计的轴承异常检测 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023 (7): 180-183.
- [17] 刘艺明, 谢丽蓉, 晁勤, 等. 风电机组轴承早期故障特征提取研究 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (2): 130-134.
- [18] 赵小强, 罗维兰, 梁浩鹏. 基于 SIR 多级残差连接密集网络的轴承故障诊断 [J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48 (6): 46-54.
- [19] 马强, 王宇航, 王智冲. 基于三稳态随机共振的轴承故障诊断研究 [J]. 中国测试, 2023, 49 (7): 89-94.
- [20] 杜康宁, 宁少慧. 基于二次迁移学习和 EfficientNetV2 的滚动轴承故障诊断 [J]. 机械传动, 2023, 47 (7): 168-176.

(上接第 56 页)