

导读:卫星导航是战略性新兴产业发展的重点领域,2020年7月31日,习近平总书记宣布中国北斗三号全球卫星导航系统正式开通,北斗正式走向全球应用新时代。国家将进一步推动北斗与移动通信、云计算、物联网、工业互联网、大数据和区块链技术的融合发展,促进卫星导航产业高端制造业、先进软件业、综合数据业和现代服务业的融合发展,持续推进北斗应用与产业化发展。

为促进卫星导航技术领域的技术交流,本刊开展了“卫星导航技术”主题专栏征文活动,着重探讨导航信号处理、精密定位、卫星导航增强技术、GNSS接收机终端技术、多源融合导航以及抗干扰与反欺骗技术等领域的热点问题,期望对从事卫星导航技术领域研究的读者有所帮助。



特约主编:纪元法,博士生导师,桂林电子科技大学教授,桂林市拔尖人才,长期从事卫星导航接收机及高精度定位技术研究,先后参与了科技部863计划、国家自然科学基金、广西创新驱动重大专项等30余项科研项目,获广西科技进步一等奖等科技奖励7项,发表学术论文100余篇,申请专利60余项。

基于 GNSS-RTK 技术的双层滑坡监测系统设计与实现 *

刘新华¹,尚俊娜¹,施浒立²

(1.杭州电子科技大学 通信工程学院,浙江 杭州 310018;2.中国科学院国家天文台,北京 100012)

摘要:滑坡、泥石流是目前我国最为多发的形变类地质灾害,建立高精度、实时、稳定的监测系统一直是倍受关注的重要安全问题。针对传统GNSS-RTK滑坡监测系统随着观测节点增加导致系统效率低下问题和基站与观测站同时位移导致的漏警问题,提出基于GNSS-RTK技术的双层滑坡监测系统,新系统在传统滑坡监测系统的基础上,在一些重要节点区域上新增微网观测系统,由“点”监测改进为微区域“面”监测,并实现了基于GNSS-RTK技术的形变数据采集和基于LoRa、LTE技术的数据传输。试验结果表明,数据传输可靠高效,且系统测量精度可达毫米级,满足滑坡监测要求,并通过调整观测站微区域中的观测节点密度和基线长度满足不同环境的需求。

关键词:滑坡监测系统;GNSS-RTK;LoRa;LTE;毫米级

中图分类号:P228.4 文献标识码:A DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200219

中文引用格式:刘新华,尚俊娜,施浒立.基于GNSS-RTK技术的双层滑坡监测系统设计与实现[J].电子技术应用,2020,46(11):1-7.

英文引用格式:Liu Xinhua, Shang Junna, Shi Huli. Design and implementation of a double-layer landslide monitoring system based on GNSS-RTK technology[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11):1-7.

Design and implementation of a double-layer landslide monitoring system based on GNSS-RTK technology

Liu Xinhua¹, Shang Junna¹, Shi Huli²

(1. College of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

* 基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(61701481);中老北斗精密形变监测合作研究及示范(SBZ2019080054);江苏省政策引导类计划(国际科技合作)——“一带一路”创新合作项目(BZ2019006)

Abstract: Landslide and debris flow are the most frequent deformation geological disasters in our country. It is an important safety issue to establish a high-precision, real-time and stable monitoring system. Aiming at the problem of low efficiency of the traditional GNSS-RTK landslide monitoring system as the number of observation nodes increases and the alarm leakage caused by the simultaneous displacement of the base station and observation station, a double-layer landslide monitoring system based on GNSS-RTK technology is proposed. The double-layer landslide monitoring system based on GNSS-RTK technology is proposed. On the basis of the traditional landslide monitoring system, the new system adds a micro network observation system in some important node areas, which is improved from the previous "point" monitoring to the micro area "surface" monitoring, and realizes the deformation data collection based on GNSS-RTK technology and data transmission based on Lora and LTE technology. The test results show that the data transmission is reliable and efficient, and the measurement accuracy of the system can reach millimeter level, which can meet the requirements of landslide monitoring. The density of observation nodes and the length of baseline in the micro area of the observation station can be adjusted to meet the needs of different environments.

Key words: landslide monitoring system; GNSS-RTK; LoRa; LTE; millimeter level

0 引言

近年来,滑坡等地质灾害所带来的损失呈增长趋势,对人民的生命和财产安全产生了严重的威胁。据统计,世界各类地质灾害造成的损失平均每年约有1 500亿美元,近80年来死于地质灾害的人数已经超过1 000万。因此对于滑坡监测的研究近年来在不断深入开展。文献[1]中针对三峡库区的滑坡问题,基于3S技术和地面变形监测台网建立了三峡库区滑坡监测系统,并通过全球定位系统(Global Positioning System,GPS)等空间技术获得滑坡形变区域分布状况,但由于在测量中直接使用基准点不方便或不合理,引入了工作点,在一定程度上增加了系统的复杂度。文献[2]采用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)进行滑坡分析,提出了切实可行的复杂滑坡分析模型和技术,给出了表现预测结果的直观的可视化的手段,但由于模型的通用性不强,不同的人预测结果具有很大差异,从而导致普适性不高。文献[3]提出了基于远距离无线电(Long Range Radio,LoRa)和通用无线分组业务(General Packet Radio Service,GPRS)的滑坡监测数据传输系统,测试结果显示该系统运行稳定,误码率低,适用于滑坡监测中的数据传输。

滑坡监测系统的研究多是对传输方式和监测方式的改进,对于监测系统模型的优化还很欠缺,因此在传统的滑坡监测系统模型基础上提出了基于全球导航卫星系统-实时动态载波相位差分技术(Global Navigation Satellite System-Real-time Kinematic,GNSS-RTK)的双层滑坡监测系统模型,并根据该模型数据量大、传输实时性强的特点,在滑坡监测区域内采用LoRa无线传输,通过通用移动通信技术的长期演进(Long Term Evolution,LTE)技术实现与后台服务器的快速交互。传统的滑坡监测系统是由基站、观测站和服务器三部分组成,新型双层滑坡监测系统从观测站入手改进,将观测站这个“点”外扩为观测站微区域系统这个“面”,可实现由“点”的监测扩大到“面”区域的监测。双层滑坡系统还使监测性能更加稳定,可解决传统监测系统基站和观测站同时偏

移的漏警问题。

1 GNSS-RTK 滑坡监测的基本原理

1.1 GNSS-RTK 测基线技术

GNSS-RTK 测量是根据 GPS 的相对定位理论即确定进行同步观测的接收机之间相对位置的卫星定位方法。实际操作则是将一台接收机设置在一个已知点上(基站),另一台或几台接收机放在待测点上(观测站),同步采集相同卫星的信号,其中主要使用的基本观测量是载波相位值^[4-7]。目前,载波相位测量相对定位中普遍采用差分法,常见的模式主要有单差模式、双差模式和三差模式^[8]。本系统中基线解算中采用的是双差模式。

卫星 j 与观测站 i 间的载波相位观测方程为:

$$\phi_i^j(t) = \frac{f_0}{c} \rho_i^j(t) + f_0[\delta t_i(t) - \delta t^j(t)] - N_i^j(t_0) + \frac{f_0}{c} [\Delta_{i,l_p}^j(t) + \Delta_{i,T}^j(t)] \quad (1)$$

式中: c 为电波传播速度, f_0 为频率(卫星发射的载波信号频率与观测站振荡器的固有参考频率相同), ρ_i^j 为卫星到观测站的伪距, $\delta t_i(t)$ 为观测站的钟差, $\delta t^j(t)$ 为卫星的钟差, N_i^j 为卫星到观测站间载波相位差的整周数, $\Delta_{i,l_p}^j(t)$ 为观测历元 t 时电离层折射对卫星载波信号传播路径的影响, $\Delta_{i,T}^j(t)$ 为观测历元 t 时对流层折射对卫星载波信号传播路径的影响。

由式(1)可得单差模式观测方程,单差观测方程是不同观测站对同一卫星载波相位观测方程的求差,可以消除测量值中的星历误差、对流层和电离层误差:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{21}^j(t) &= \frac{f_0}{c} [\rho_2^j(t) - \rho_1^j(t)] + f_0[\delta t_2(t) - \delta t_1(t)] \\ &\quad - [N_2^j(t_0) - N_1^j(t_0)] + \frac{f_0}{c} [\Delta_{2,l_p}^j(t) - \Delta_{1,l_p}^j(t)] \\ &\quad + \frac{f_0}{c} [\Delta_{2,T}^j(t) - \Delta_{1,T}^j(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

整理单差观测方程得:

$$\Delta\phi_{21}^j(t) = \frac{f_0}{c} [\rho_2^j(t) - \rho_1^j(t)] + f_0 \Delta t_{21}(t) - \Delta N_{21}^j(t_0) \quad (3)$$

式中: $\Delta t_{21}(t) = \delta t_2(t) - \delta t_1(t)$, $\Delta N_{21}^j(t_0) = N_2^j(t_0) - N_1^j(t_0)$ 。

由于观测站顶上同一时刻存在的卫星远不止两颗,一般最少有4颗,双差法考虑到一根基线的两个观测站可以同时测量到两颗以上卫星信号的情况,在单差的基础上再作一次差,可以消除与观测站有关的载波相位误差和时钟误差,由式(3)得双差方程为:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\phi_{21}^{kj}(t) &= \Delta\phi_{21}^k(t) - \Delta\phi_{21}^j(t) \\ &= (\Delta\phi_2^k(t) - \Delta\phi_1^k(t)) - (\Delta\phi_2^j(t) - \Delta\phi_1^j(t)) \\ &= \frac{f_0}{c} [\rho_2^k(t) - \rho_1^k(t) - (\rho_2^j(t) - \rho_1^j(t))] - \nabla\Delta N_{21}^{kj} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\nabla\Delta N_{21}^{kj} = \Delta N_{21}^k - \Delta N_{21}^j$ 。

由于后续要进行加权最小二乘求解浮点解,因此要将所得双差方程线性化。假设在两个观测站间的基线矢量($\delta X, \delta Y, \delta Z$)。两观测卫星 k 和 j 中选取高度角较高的 j 为参考卫星,则双差观测方程的线性化形式为:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\phi_{21}^j(t) &= -\frac{f_0}{c} [l(t) \ m(t) \ n(t)] \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{f_0}{c} [\rho_{20}^k(t) - \rho_{20}^j(t) - \rho_1^k(t) + \rho_1^j(t)] - \nabla\Delta N_{21}^{kj} \end{aligned} \quad (5)$$

整理可得:

$$\lambda \nabla\Delta\phi_{21}^j(t) - L = -[l(t) \ m(t) \ n(t)] \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} - \lambda \nabla\Delta N_{21}^{kj} \quad (6)$$

式中: λ 为波长, L 为双差后的伪距项差值。

若某一历元观测到的 GPS 卫星和 BDS 卫星分别为 p 颗和 q 颗,则可将线性化后的双差观测方程写成矩阵的形式:

$$[\lambda \nabla\Delta\phi_{21}^j(t) - L] = \begin{bmatrix} A & B & C \end{bmatrix}_{(p+q-2) \times 1} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}_{3 \times 1} \begin{bmatrix} \nabla\Delta N^G \\ \nabla\Delta N^B \end{bmatrix}_{(p-1) \times 1} \quad (7)$$

式中: A 为基线向量对应的矩阵系数, B 为 GPS 双差后整周模糊度对应的矩阵系数, C 为 BDS 双差后整周模糊度对应的矩阵系数, δX 为基线向量, $\nabla\Delta N^G$ 为 GPS 双差后的整周模糊度, $\nabla\Delta N^B$ 为 BDS 双差后的整周模糊度。

形如 $L = BX$ 的方程就可以使用加权最小二乘进行求解,因此对双差方程进行加权最小二乘估计得:

$$\hat{X} = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (8)$$

式中: P 为加权最小二乘中的权矩阵。

得到加权最小二乘估计的浮点解后,再经过经典的 LAMBDA 算法搜索整周模糊度固定解,反过来对加权最

小二乘估计的 RTK 基线 dX 进行修正,最终得到高精度 RTK 基线解。

1.2 GNSS-RTK 用于滑坡监测

滑坡监测主要内容为地表变形监测、裂缝监测、地面倾斜监测、滑动面位移监测等,其主要的观测数据是位移量和角度变化量^[9-12]。采用 GNSS-RTK 技术定位时就是利用其测出的基线长度和基线姿态角度进行定位的,因此可以通过基线长的变化反映滑坡监测中的位移量。用于滑坡监测时,首先需要在山顶或是信号较好的空旷地设立一个基准站,一是为了使 GNSS-RTK 定位中一点的绝对位置较为准确,二是为了更好地将整合的数据通过无线传输给后台,然后根据滑坡的实际情况,在需要监测的地点设立观测点,通过基准站与观测点之间基线长度的变化确定是否发生滑坡,但由于存在基准站和观测站同时偏移导致基线长度不变的几率,因此设计双层滑坡监测系统能有效地解决漏警问题。

2 GNSS-RTK 双层滑坡监测系统

2.1 总体结构设计

双层滑坡监测系统总体结构如图 1 所示,由基准站、观测站微区域监测系统和后台服务器三部分组成。在基准站和观测站微区域监测系统的主节点上都放有 GNSS 天线模块、GNSS 数据处理模块和 LoRa 无线通信模块,主要用于基准站与观测站主节点的形变测量及基线长度解算和数据交互。观测站微区域监测系统由一个主节点和多个辅节点组成,辅节点放有 GNSS 天线模块,与主节点上天线模块构成基线,用于观测站微区域监测系统内形变数据的观测,然后整合数据,并通过主节点上的 LoRa 模块把整合数据传输给基准站。基准站上还装有 LTE 模块,用于将基准站整合完的数据发给后台服务器。后台服务器会对基准站发来的数据进行处理分析,并显示滑坡区域状况,同时反馈给基准站,然后由基准站判断是否应该发出滑坡预警信息。

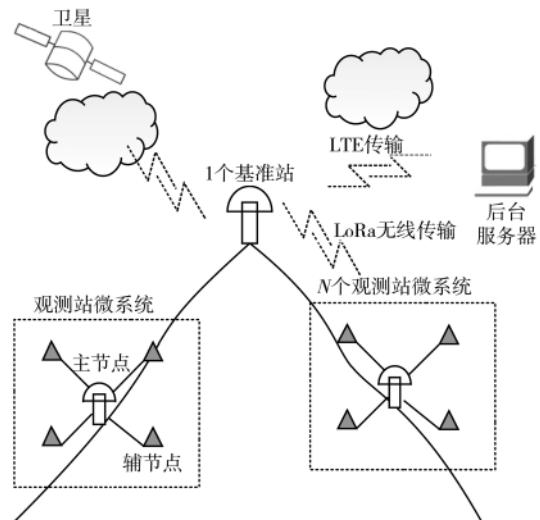


图 1 系统总体框架

2.2 硬件设计

根据滑坡监测系统的实际需要,GNSS-RTK双层滑坡监测系统的硬件主要包括卫星信号接收模块、数据处理模块、LoRa无线传输模块、LTE无线传输模块、后台计算机等。GNSS-RTK双层滑坡监测系统的硬件原理图如图2所示。

卫星接收模块采用HP8863,LoRa无线传输模块选用HC-12无线串口通信模块,LTE无线传输模块采用的是USR-G780 4G LTE DTU。形变数据的采集主要分为两层:一是观测站微区域内形变数据的采集,采用有线连接,后可根据实际情况确定有线或无线;二是观测站微区域主节点与基准站间形变数据的采集,采用LoRa无线传输构成基线。数据传输如图3所示。

双层滑坡监测系统的硬件设计主要特点在于将形变数据的采集分为双层同时进行,由于最终解算输出的基线数据量要远小于参与基线解算的卫星原始数据量,因此可以有效降低基站的负荷,从而达到提高系统效率的作用;有线与无线的结合也使得新系统比传统滑坡模

型的数据传输更加可靠高效;采用模块化结构,有利于后期系统的管理与维护。

2.3 软件设计

GNSS-RTK双层滑坡检测系统的软件主要分为数据处理模块中的基线解算和后台服务器的数据自动监测两部分,其主要部分是对于基线的解算。以GNSS-RTK测基线原理为基础,首先将GNSS天线模块接收到的原始数据转换为标准的RINEX格式,根据双差模型组成双差观测方程,之后采用加权最小二乘估计法求解浮点解,相较于传统的最小二乘估计法可以有效提高浮点解的精度,然后采用经典的LAMBDA算法求解整周模糊度,最后经过基线长度有效性检验后的整周模糊度将对基线进行不断修正,解算流程如图4所示。

后台服务器的数据自动监测采用模块化结构,如图5所示。主要设置参数为波特率、预警报警阈值等。采集存储主要包括将传来的多个天线间的基线数据放入后台服务器的既定位置,从而实现基线数据与实际测试区域的一一对应。数据及曲线显示可以直观地看出各基线长

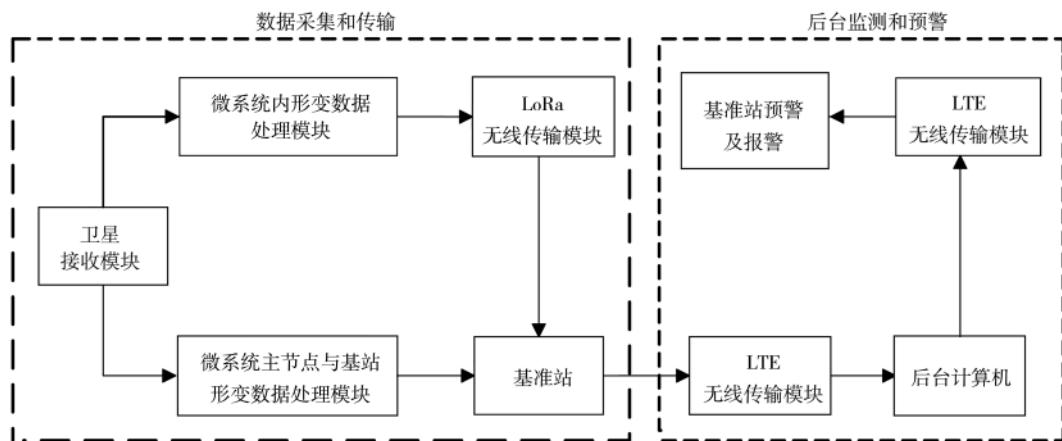


图2 GNSS-RTK双层滑坡监测系统的硬件原理图

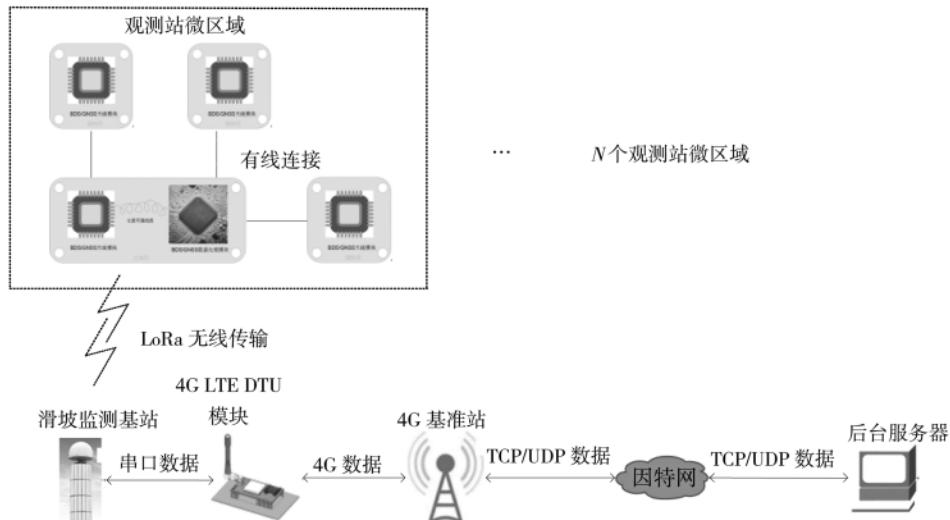


图3 数据传输

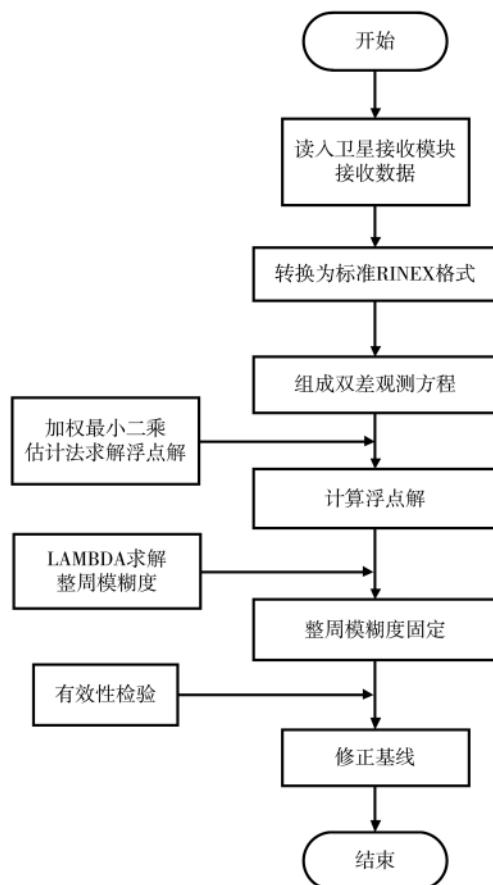


图 4 基线解算流程图

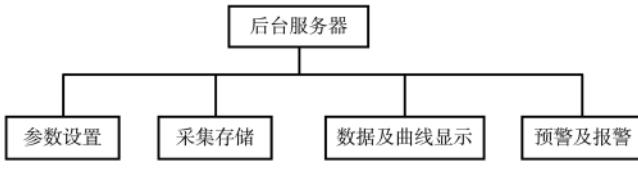


图 5 后台服务器软件模块

度变化趋势。最后根据设定的阈值和监测数据确定是否需要发出警报。

2.4 功能与特点

GNSS-RTK 双层滑坡监测系统是基于卫星导航定位的自动监测系统,卫星的绝对定位可以解决其他监测系统可能由于长时间监测而存在的累积误差,且其高精度和实时性是可以起到滑坡灾害防范的作用。硬件的模块化也使得 GNSS-RTK 双层滑坡监测系统在实际应用中更加灵活,后台服务器对预警及报警阈值进行设置,通过 4G LTE 无线传输对基准站传来的数据进行处理并及时反馈滑坡区域状况,可构成完整的 GNSS-RTK 自动监测系统,满足滑坡监测及预防的实际需求。

综合各方面考虑,GNSS-RTK 双层滑坡系统的功能与特点主要体现在以下几个方面:

(1)GNSS-RTK 测量:使用 GNSS-RTK 技术可以实现实时动态定位。在滑坡系统中,数据的实时采集和传输

对系统性能会产生很大影响,GNSS-RTK 技术的高精度也使得滑坡测量更加精确,因此将 GNSS-RTK 技术引入到滑坡监测系统中会提高滑坡监测系统的有效性和可靠性。

(2)微区域监测:在传统滑坡系统基础上,将“点”型观测站改进为微区域“面”型观测,观测站微区域监测系统的加入在确保获取更多监测信息的同时也不增加基站的运算负荷,这对系统长期稳定运行至关重要。

(3)无线传输:滑坡监测微区域内采用 LoRa 无线传输,性价比较高,与后台服务器间的信息交互采用 4G LTE 无线传输,相较于以往的 GPRS 传输,考虑到 2G 基站的不断减少和该系统数据量较大两方面,选择 4G LTE 更适合本系统基于 GNSS-RTK 技术的滑坡监测。

(4)数据处理:基于 GNSS-RTK 技术的滑坡监测经数据处理后输出的基本数据是基线长度,这对于服务器后台的数据存储、波形显示、预警及报警设置等都很方便。

3 实验分析

本实验在中科苏州地理科学研究院进行,现场测试图如图 6 所示。采用 1 个主节点、4 个辅节点的微区域结构,4 个辅节点分别与主节点组成基线,接收模块可以输出伪距、载波相位等数据,经数据处理模块处理后通过 LoRa 无线模块送给计算机,输出结果如图 7 所示。



图 6 现场测试图

测试输出结果中,“Get 20 satellite”代表获得 20 个卫星信号, ID1-1 代表编号为 1 的观测站主节点与该微区域中编号为 1 的辅节点间的形变数据,第二、第三、第四个数据分别为空间内两节点间的 X、Y、Z 距离,最后一个数据为两者间的测试距离即基线长度。经过长时间的观察发现传输过程流畅无误码,可满足野外滑坡系统中的传输要求。

```

>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.784,-1.521,-0.246,3.182
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.068,-0.100,-0.438,2.116
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.784,-1.532,-0.246,3.187
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.784,-1.528,-0.245,3.185
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.790,-1.526,-0.242,3.188
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.788,-1.521,-0.247,3.185
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.782,-1.530,-0.248,3.184
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.786,-1.528,-0.241,3.186
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.787,-1.523,-0.248,3.186
>>> Get 20 satellite
ID1-1,-2.780,-1.528,-0.249,3.182
  
```

图 7 测试输出结果

为了验证不同基线长度下的系统性能,编写了MATLAB程序,分别分析了在观测站微区域中基线长度为2.99 m、33.82 m和93.01 m的测量数据,分析结果如图8~图11所示。

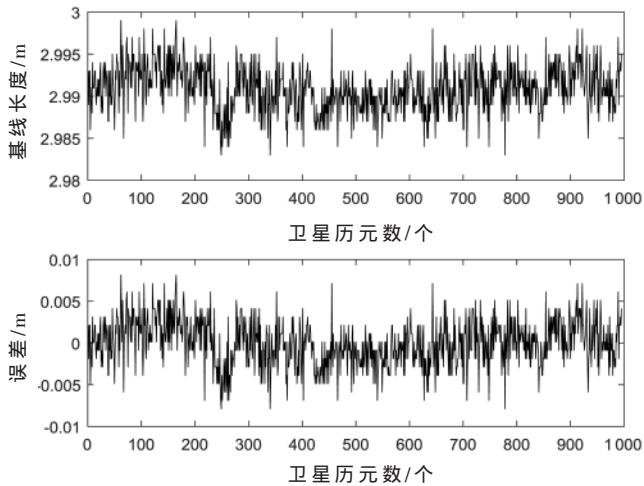


图 8 2.99 m 基线测试结果

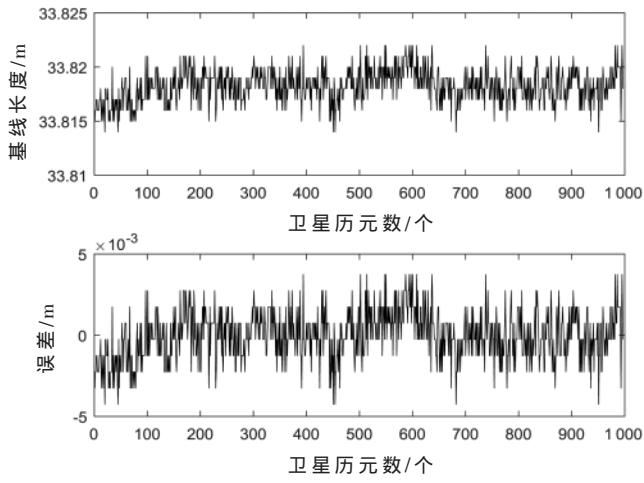


图 9 33.82 m 基线测试结果

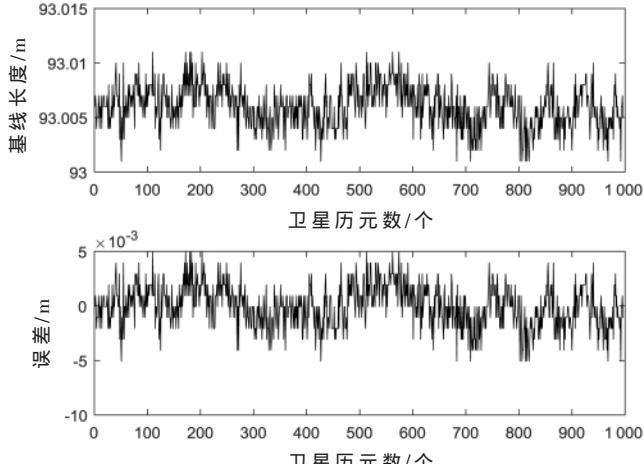


图 10 93.01 m 基线测试结果

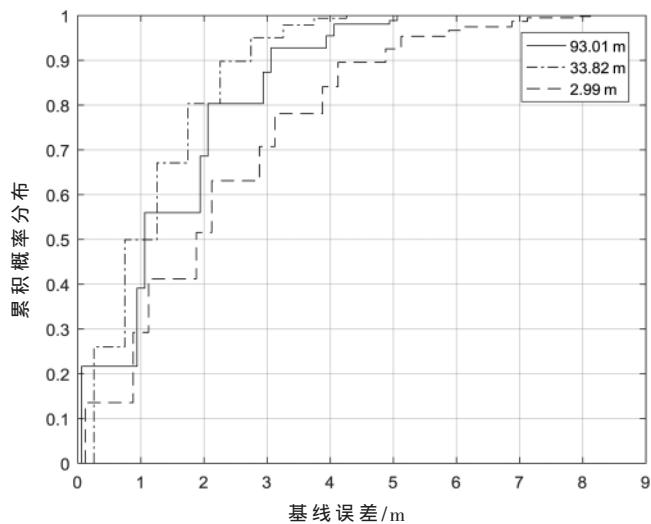


图 11 基线误差 CDF 图

结果表明,该系统基线测试结果稳定高效,从累积分布函数(Cumulative Distribution Function,CDF)图中可知,误差集中在3 mm以内,精度方面满足高精度滑坡监测要求,从数据处理方面验证了该系统的可行性。在确保毫米级精度的前提下,基线长度的可变性也使得观测站微区域监测系统的确定更加灵活。

为了验证微区域内不同观测节点密度对系统的影响,进行了如下实验:对于同一主节点,分别进行辅节点数为1、2、3和4的基线解算,且保持各辅节点到主节点的基线长度为3 m,实验结果如表1所示。

表 1 不同观测节点密度分析

辅节点个数	基线编号	基线解算平均值/m	均方根误差/mm	微区域平均误差/mm
1	01ID1-1	2.993	2.63	2.63
	02ID1-1	2.976	2.66	
2	02ID1-2	2.995	3.04	2.85
	03ID1-1	2.993	2.86	
3	03ID1-2	3.002	2.51	2.68
	03ID1-3	3.011	2.68	
4	04ID1-1	2.995	2.12	2.53
	04ID1-2	2.997	2.99	
	04ID1-3	2.997	3.15	
	04ID1-4	3.006	1.86	

由表1可知,随着节点密度即辅节点个数的增加,基线解算精度仍能保持在3 mm以内,说明在实际应用中可以根据不同环境分配辅节点个数,从而实现对主滑坡区域更加全面的监测。

为比较双层滑坡监测系统模型与单层监测系统模型的性能,以10个观测点为例,双层滑坡系统设置两个微网监测区域,每个区域包括1个主节点与4个辅节点,性能主要包括基站解算负荷即单个卫星历元下基站需解算基线的次数、100次基线解算时间即基站有效输

出 100 次每个观测点基线数据所花费的总的解算时间和基线解算的平均均方根误差, 性能对比如表 2 所示。

表 2 单层与双层模型性能对比

滑坡模型	基站 解算负荷/ (次/历元)	100 次 基线解算 时间/s	平均 均方根 误差/mm
单层 GNSS-RTK 滑坡监测模型	10	116.5	3.23
双层 GNSS-RTK 滑坡监测模型	2	103.4	2.74

由解算结果可知, 双层滑坡监测系统中微网观测系统的引入有效降低了基站解算负荷, 在解算输出次数保持一致的情况下, 双层百次基线解算时间要明显优于单层, 并且解算精度也要高于单层, 主要原因有两点: 一是双层模型中, 微网观测区域内采用的是有线连接, 相较于传统单层模型中的无线传输更加高效可靠; 二是双层模型中, 基站只需与微网观测区域内的主节点进行基线解算, 微区域内的基线解算由该区域内的主节点控制, 因此可同步进行基线解算, 最后主节点只需将解算结果通过无线传给基站即可。

同时与近几年来较为流行且已实现应用的滑坡监测方式的精度和优缺点进行了对比分析, 如表 3 所示。

4 结论

本文提出了一种基于 GNSS-RTK 技术的新型双层滑坡监测系统, 主要实现了基准站、观测站微区域监测系统和后台服务器间的数据传输和数据处理, 由传统的“点”型观测站改进为“面”型微区域观测站, 实现双层滑坡系统监测, 减少了基站的运算负荷, 提高了滑坡监测的精确度, 采用 GNSS-RTK 技术使基线测量精度达到毫米级且性能稳定, 满足高精度滑坡监测需求, 且为其他精密测量领域提供参考。

参考文献

- [1] 欧阳祖熙, 张宗润, 丁凯, 等. 基于 3S 技术和地面变形观测的三峡库区典型地段滑坡监测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(18): 3203–3210.
- [2] 兰恒星, 王苓涓, 周成虎. 地理信息系统支持下的滑坡灾害分析模型研究[J]. 工程地质学报, 2002(4): 421–427.
- [3] 张波, 尚俊娜. 基于 LoRa 和 GPRS 的滑坡监测数据传输系统[J]. 通信技术, 2018, 51(12): 2999–3005.

表 3 不同监测方法对比

滑坡监测方法	监测精度/mm	主要特点	主要缺点
双层 GNSS-RTK	3	分层、实时、自动	需在信号较好处布置
GPS-RTK ^[13]	15	全天候、实时、自动	测点较多时, 基站负荷大
全站仪 ^[14]	2	高精度、便捷	成本高
测量机器人 ^[15]	5	数据质量好、自动	存在人为测量误差

- [4] Tian Yijun, Sui Lifen, Xiao Guorui, et al. Estimating inter-system biases for tightly combined Galileo/BDS/GPS GNSS-RTK[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(1): 572–585.
- [5] 高旺, 高成发, 潘树国, 等. 北斗三频宽巷组合网络 GNSS-RTK 单历元定位方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 641–648.
- [6] 袁正午, 何格格. 一种高精度的 GPS-RTK 定位技术设计与实现[J]. 电子技术应用, 2018, 44(6): 63–67.
- [7] 王建中, 杨璐. 基于 GPS 定向测姿系统的研究[J]. 电子技术应用, 2016, 42(9): 14–18.
- [8] 茅文深, 常传文, 夏娜. 基于导航卫星的载体姿态测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [9] NAPPO N, PEDUTO D, MAVROULI O, et al. Slow-moving landslides interacting with the road network: analysis of damage using ancillary data, in situ surveys and multi-source monitoring data[J]. Engineering Geology, 2019, 260(3).
- [10] 卢兴森, 陈苏婷, 施佳驰. 基于北斗和 ZigBee 的农田数据采集与传输[J]. 电子技术应用, 2015, 41(6): 35–37, 41.
- [11] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730–741.
- [12] 秦红磊, 孙小续. 基于 GP4020 的 GPS 接收机的软硬件设计[J]. 电子技术应用, 2008(1): 9–13.
- [13] 赵晋帅. GPS RTK 技术在滑坡动态实时变形监测中的应用[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 72–74.
- [14] 王湘文. 使用全站仪进行滑坡监测的精度分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(12): 218–221.
- [15] 张伟琪. 黄土滑坡高精度变形监测及预测方法研究[D]. 长安大学, 2019.

(收稿日期: 2020-03-23)

作者简介:

刘新华(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向: 通信信号处理、卫星导航定位。

尚俊娜(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 通信信号处理、卫星导航定位。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所