

韩军强,黄观文,李哲.复杂环境下GNSS滑坡监测多路径效应分析及处理方法[J].地球科学与环境学报,2018,40(3):355-362.
HAN Jun-qiang, HUANG Guan-wen, LI Zhe. Multipath Effect Analysis and Processing Method of GNSS Landslide Monitoring Under Complicated Environment[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(3): 355-362.

复杂环境下 GNSS 滑坡监测多路径 效应分析及处理方法

韩军强,黄观文*,李哲

(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:GNSS-RTK 技术用于地形地貌、植被环境较为复杂区域监测形变时,因反射引发的多路径效应会对形变监测结果产生较大影响,严重制约该技术应用于高精度滑坡监测。针对复杂环境下 GNSS 滑坡监测多路径效应,通过采集秦巴山区监测环境与黄土监测环境下 GNSS 滑坡形变监测数据,对不同环境的可视卫星观测范围、信噪比及多路径效应序列进行详细分析,并利用恒星日滤波法对多路径效应序列进行修正,验证复杂环境下削弱多路径效应的方法和精度。结果表明:受监测地形影响,多路径效应与低高度角相关关系减弱,采用单一截止高度角削弱多路径效应的方法不适用;复杂环境引起的多路径效应可达 2 m,其定位精度无法满足形变监测要求;通过小波去噪,对定位结果采用恒星日滤波法提取误差趋势项,并用于相邻两天的定位误差实时修正,发现采用恒星日滤波法进行多路径效应修正后使定位残差提高至毫米级,东、北和高程 3 个方向精度分别提高 84.38%、72.88%、64.84%。

关键词:滑坡;多路径效应;GNSS-RTK 技术;复杂环境;高度角;恒星日滤波法;形变监测
中图分类号:P228.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2018)03-0355-08

Multipath Effect Analysis and Processing Method of GNSS Landslide Monitoring Under Complicated Environment

HAN Jun-qiang, HUANG Guan-wen*, LI Zhe

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: GNSS-RTK technology has been widely used in deformation monitoring. However, the multipath effect has a great impact on deformation monitoring under complicated environment, which seriously restricts the application in high-precision landslide monitoring. In order to eliminate the multipath effect of GNSS landslide monitoring under complicated environment, the GNSS landslide deformation monitoring data under Qinba mountain area and loess monitoring environments were collected to analyze the range of visible satellite, SNR and multipath effect sequences, and the sidereal filtering method was used to correct the multipath effect sequences, and to verify the method and accuracy for weakening the multipath effect under complicated environment. The results show that because of the terrain, the correlation between multipath

收稿日期:2018-01-28;修回日期:2018-03-06 投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41774025,41731066);陕西省自然科学基金项目(2016JQ4011);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD310826171004);中国第二代卫星导航系统重大专项项目(GFZX0301040308)

作者简介:韩军强(1989-),男,陕西渭南人,工学博士研究生,E-mail:281394283@qq.com。

* 通讯作者:黄观文(1983-),男,江苏淮安人,副教授,工学博士,E-mail:huang830928@163.com。

effect and elevation is weakened, and the single cutoff elevation is not fine to weaken the multipath effect; the multipath effect under complicated environment is up to 2 m, which can not meet the requirements of deformation monitoring; based on wavelet denoising, the error trend terms are extracted from positioning results by sidereal filtering method, and are used to correct the positioning error of two continuous days in real time; the positioning residual errors are promoted to millimeter-level, and the accuracies in east, north and elevation directions increase by 84.38%, 72.88% and 64.84%, respectively.

Key words: landslide; multipath effect; GNSS-RTK technology; complicated environment; elevation angle; sidereal filtering method; deformation monitoring

0 引言

中国是世界上滑坡灾害非常严重的国家之一。自 2011 年以来,中国每年平均发生滑坡和泥石流灾害 12 000 余起,共计死伤约 2 652 人,失踪约 332 人,受灾人口超过 90 万,直接损失高达 60 亿元^[1-2]。近年来,国内外研究人员对滑坡监测技术进行重点研究。滑坡监测常用手段包括深部位移计、遥感技术(RS)、合成孔径雷达测量技术(InSAR)以及近景摄影测量技术等^[3]。但受监测范围和更新时效性限制,上述方法无法实现高频率、高精度实时监测。

随着 GNSS 地壳技术的现代化,GNSS 技术逐渐成为滑坡等地壳形变监测的重要手段之一^[4-6]。该技术具有操作简单、全天候、高精度、全自动等优点。国内外很多研究人员对其在滑坡形变监测中的应用进行了研究:王利等结合类滑坡大型物理模型试验,认为 GPS 手段在一定条件下完全可用于滑坡灾害的动态实时变形监测^[7-8];刘永丽等基于 GNSS 技术实现了高精度滑坡灾害形变监测的实际应用^[4,9-10]。目前,基于 GNSS 技术的形变监测已经在桥梁、建筑、尾矿等领域得到成熟应用^[11],但对于地形地貌较为复杂的滑坡形变监测还存在较大局限性。

由于 GNSS 技术在测量中易受地形和周围植被等反射引发的多路径效应影响^[12-13],所以多路径效应一直是制约 GNSS 技术复杂环境监测应用的关键因素^[14-16]。目前,有关监测环境多路径效应分析的数据源大多收集自开阔监测环境或仿真环境,针对复杂环境下 GNSS 滑坡监测多路径效应的研究较少^[17-18]。基于此,本文以陕西泾阳开阔无遮挡的黄土监测环境为参考,以秦巴山区监测环境为试点,对在地貌复杂的监测环境下 GNSS 滑坡监测多路径效应进行深入比较分析,求解恒星日周期的多路径效应序列并进行相关性分析,最后采用恒星日滤波法对多路径误差影响进行修正补偿,并验证其

修正精度和有效性。

1 多路径效应

1.1 原理

GNSS 接收机接收卫星直射信号的同时,会接收到周围物体的折射或反射信号,这些信号叠加产生干涉作用,从而影响码和相位测量结果,这种因干涉作用产生的测量误差被称为多路径效应。多路径效应的影响可分为 3 种情况^[19-20]:信号通过金属环境导致的散射效应、近距离物体的反射作用、水面反射引起的低频影响。竖直反射面多路径效应见图 1。

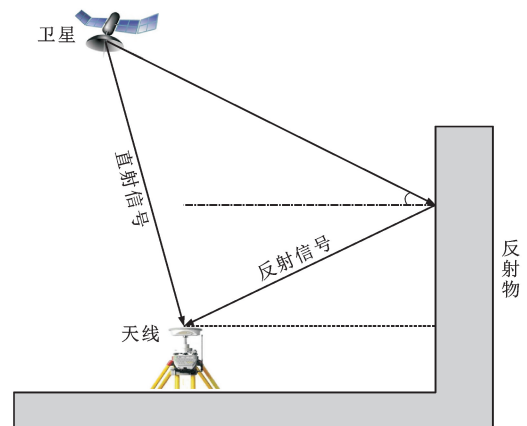


图 1 竖直反射面多路径效应

Fig. 1 Multipath Effect of Vertical Reflector

GNSS 技术的形变监测受植被、地形等影响,天线周围反射面往往有多个。当多个反射面共同影响时,其信号可表示为^[20]

$$S_c(t) = S_d(t) + S_r(t) \quad (1)$$

$$S_d(t) = A \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

$$S_r(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_k A \cos(\omega_0 t + \theta_k) \quad (3)$$

式中: $S_c(t)$ 、 $S_d(t)$ 、 $S_r(t)$ 分别为时刻 t 的直射、反射、组合信号; α_k 为第 k 个反射面的反射系数; n 为

反射信号个数; A 为直接信号的振幅; ω_0 为信号角频率; θ_k 为第 k 个反射面的反射信号相对直射信号相位延迟。

实时动态(RTK)技术是目前GNSS监测手段的关键数据处理方法。该方法采用载波相位双差观测值,不仅可以消除接收机端和卫星端的相关误差,而且可以削弱电离层、对流层等大气误差,从而实现厘米级至毫米级监测精度。但是,当监测环境遮挡严重时,接收机端的多路径误差较大且相关性弱,双差观测值无法有效消除,使得多路径误差成为制约监测精度的关键。

1.2 计算公式

多路径效应常常用于表示GNSS技术在测量中环境引发的多路径对定位信号的影响^[12,16]。其计算公式为^[21-22]

$$E_i^{\text{MP}} = p_i - m_{ij}\lambda_i\varphi_i + (m_{ij} - 1) \cdot \lambda_i\varphi_i - B_i \quad (4)$$

式中: E_i^{MP} 为多路径对信号频率 i 的影响; p_i 为信号频率 i 的伪距观测值; φ_i 和 λ_i 分别为信号频率 i 的相位观测值和波长; m_{ij} 为信号频率 i 、 j 的常量; B_i 为信号频率 i 包含了模糊度、硬件延迟和多路径常数部分的偏差项。

从式(4)可以看出,多路径效应计算方程消除了大气相关误差、几何相关误差和钟差,剩余包含模糊度、信息硬件延迟、多路径以及观测噪声。一般情况下,通过估计连续弧段的平均值,用原始组合观测值减去得到观测噪声和多路径误差变化部分。因为观测噪声具有高斯白噪声特性,所以一般采用组合信号分析环境对卫星定位信号的多路径效应特性。

2 恒星日滤波

一般中地球轨道(MEO)卫星设计运行周期为0.5个恒星日(约11小时58分钟),这一重复周期使轨道误差和接收机引起的环境误差具有恒星日重复性。恒星日滤波法即是利用小波、经验模态分解等方法对这一重复误差通过去噪,提取出监测序列恒星日趋势项,再对下一个恒星日的监测进行修正,从而削弱与观测站环境有关的周期性误差^[23]。

变形监测中由于接收机受周围环境植被遮挡的影响,观测结果存在恒星日周期性误差,一般采用恒星日滤波法提高监测精度。本文取近似恒星日(23小时56分钟),利用MATLAB工具箱函数小波(db8小波及硬阈值)函数对坐标残差序列进行修正,验证复杂环境下削弱多路径效应的方法

和精度。

3 试验分析

3.1 区域概况

本文选择两组不同滑坡监测环境,即秦巴山区监测环境(图2)和黄土监测环境(图3)。其中,秦巴山区监测环境地处陕西省宁强县代家坝镇,监测墩布施于山体坡面中部,一侧环山,周围地形起伏,植被较密,实时动态监测距离为147.74 m;黄土监测环境地处陕西省紫阳县巴庙镇南塬,监测点布施于平坦农田之上,周围视野开阔,观测环境较好,实时动态监测距离为278.30 m。本文分析研究主要针对秦巴山区监测环境进行,监测基线均为短基线。

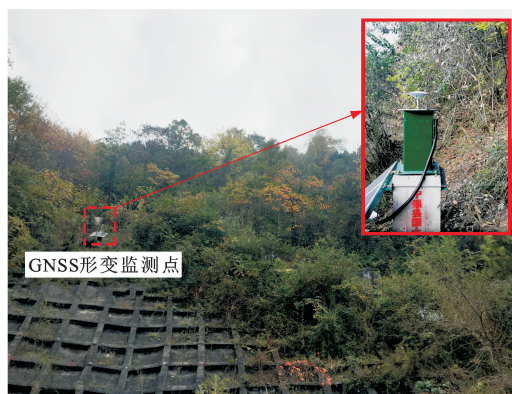


图2 秦巴山区监测环境

Fig. 2 Monitoring Environment of Qinba Mountain Area



图3 黄土监测环境

Fig. 3 Monitoring Environment of Loess

数据采集时段为2018年1月19日(年积日019)至2018年1月21日(年积日021)3 d的GNSS观测数据,广播星历下载自国际卫星定位服务中心(IGS)网站。监测区域统一采用和芯星通高精度UB380接收机和HG-GOYH7151高精度天线,数据采集间隔为1 s,截止高度角设置为 5° 。

3.2 卫星可视范围与信噪比

一般情况下,接收机对高度角大于 5° 的卫星

均可跟踪。受地形起伏、植被遮挡等因素影响,监测时卫星可视范围较开阔环境差异较大。信噪比是指载波信号强度与噪声强度的比值,受多路径效应影响变化较大^[17]。当监测接收机周围无遮挡时,观测值受多路径效应影响较小。然而,受监测

地形和接收机周围植被等影响,信噪比变化较大。本文采用 RTKLIB2. 4. 2 软件计算秦巴山区监测环境和黄土监测环境同一时段的卫星高度角及方位角。图 4 为复杂环境和开阔环境卫星天空环视图及信噪比分布。

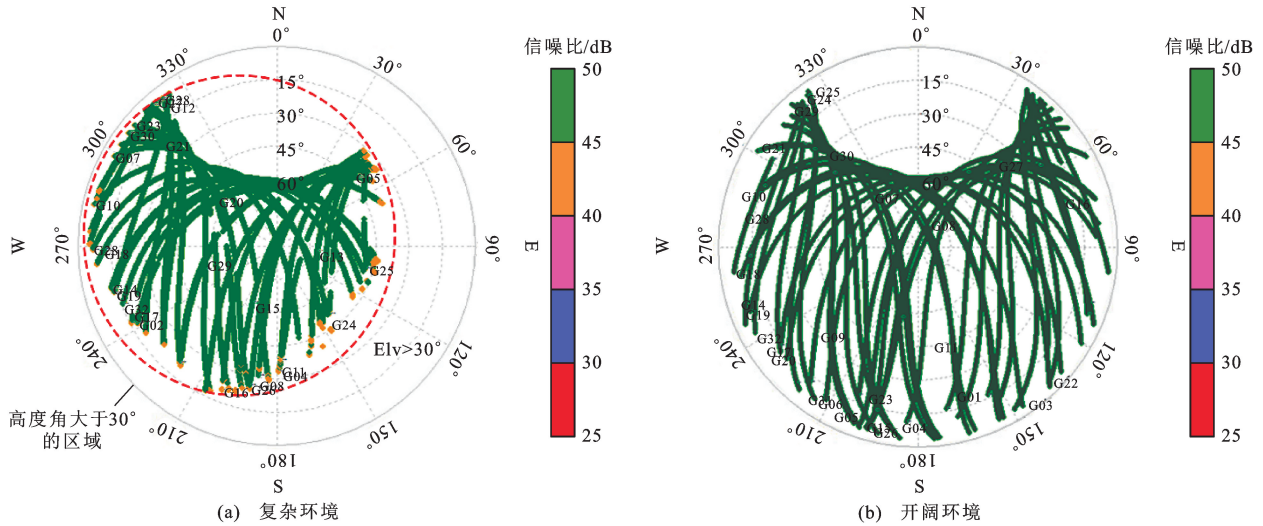


图 4 复杂环境和开阔环境卫星天空环视图及信噪比分布

Fig. 4 Satellite Polar Coordinates and SNR Under Complicated and Open Environments

通过对比可以看出,相比开阔环境,受地形起伏、植被遮挡等因素影响,复杂环境下监测点卫星可视范围减少超过 25%。从图 4(a)可以发现,当卫星轨迹接近观测边缘时,受周围植被等反射影响,信噪比显著降低,低信噪比并非分布在低高度角范围内。从图 4(a)还可以看出:方位角为 270°~360°时,最低信噪比卫星的截止高度角为 15°;方位角为 90°~180°时,最低信噪比卫星截止高度角大于 30°,甚至更高。如此复杂环境下若采用低截止高度角,则无法剔除部分较差观测数据,相反则会剔除过多有效观测数据。因此,对于秦巴山区监测环境需建立合理的截止高度角策略。

3.3 多路径效应

植被会对卫星信号产生较大的多路径效应,多路径效应组合观测值可以反映多路径效应的量级。为了比较复杂环境与开阔环境多路径效应的影响量级,本文计算了秦巴山区监测环境下的卫星 MP1 序列和同时段黄土监测环境下共视卫星 MP1 序列。图 5 给出了两种环境下的信噪比序列,图 6 列出了对应的 MP1 序列。从图 6 可以看出:复杂环境对接收机的多路径效应(MP1 值)最大达到了 2 m,且波动频率较高,无法正常用于滑坡监测和预报预警。从图 5 可以看出:开阔环境下卫星的信噪比序列相对较稳定,如 G16 与 G26 卫星较明显;而复杂环

境下的信噪比序列波动较大,采用信噪比削弱多路径效应有限。因此,本文通过恒星日滤波法削弱多路径效应对实时动态定位结果的影响,并评价其修正精度。

为了验证相邻两天多路径效应序列相关性,本文以年积日 020 至年积日 021 为例对相邻两天卫星 MP1 序列进行比较分析(图 7)。从图 7 明显看出,相邻两天卫星 MP1 序列高度重合。在概率论和统计学中,常采用相关系数描述两个随机变量之间线性相关性的强度和方向。其相关系数与相关程度见表 1。

表 1 相关系数与相关程度

Tab. 1 Correlation Coefficients and Degrees

序号	相关系数	相关程度
1	0.00~±0.30	微相关
2	±0.30~±0.50	实相关
3	±0.50~±0.80	显著相关
4	±0.80~±1.00	高度相关

本文采用 MATLAB 功能函数 corrcoef 计算了 G01~G32 卫星相邻两天 MP1 序列相关关系(图 8)。从图 8 可以看出,相邻两天 MP1 序列高度相关,平均相关系数为 86.55%,最小相关系数为 70.40%,最大相关系数为 97.70%。由此可见,复杂环境下多路径效应重复性较高,因此,可通过恒星

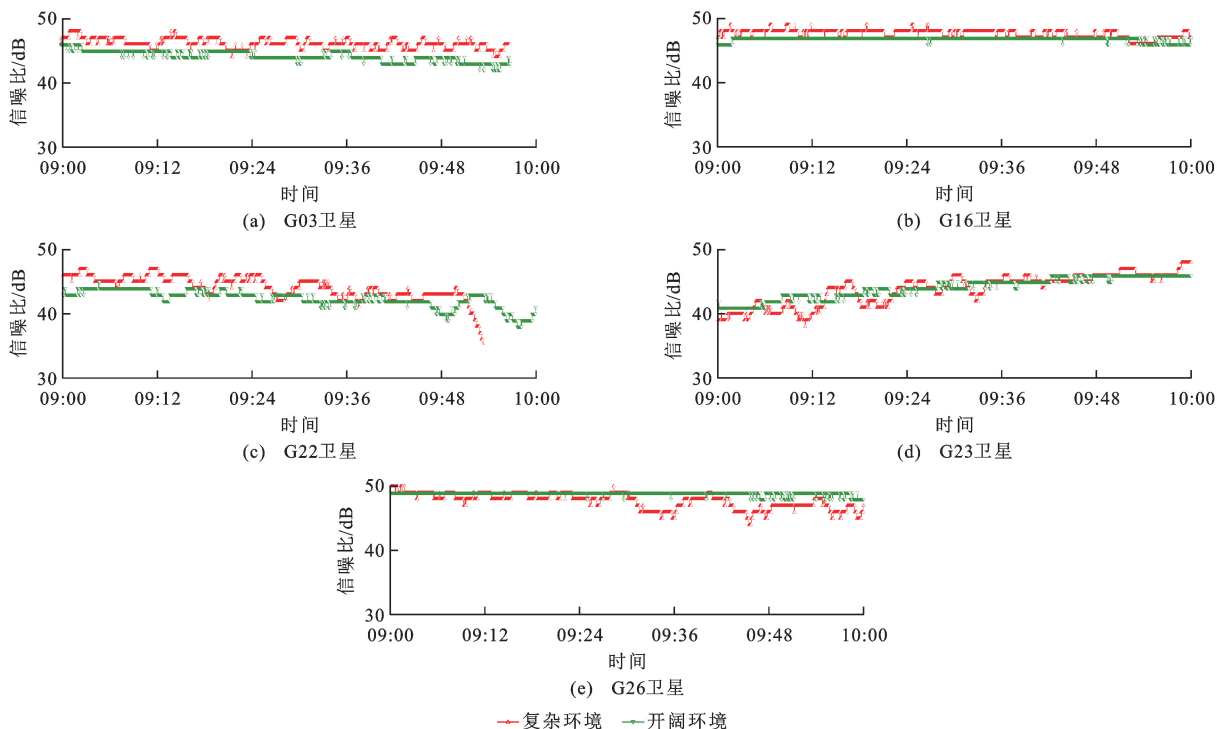
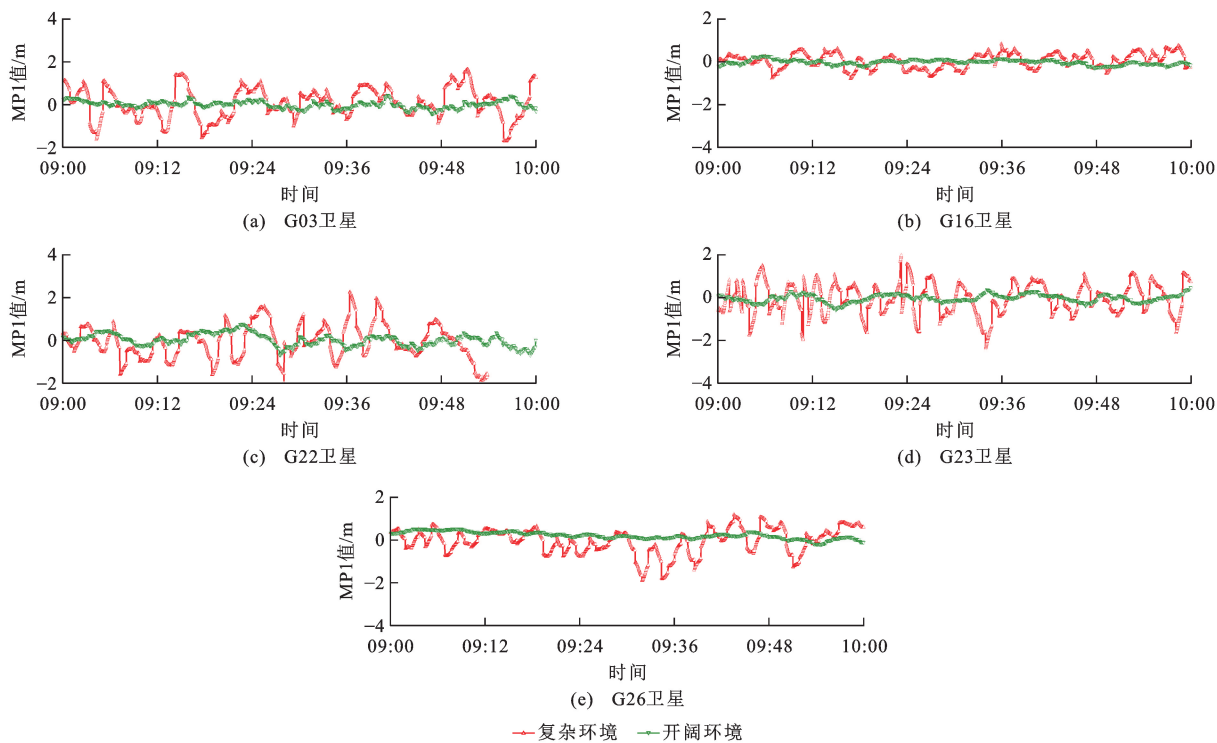


图 5 不同监测环境的信噪比序列

Fig. 5 SNR Sequences Under Different Environments



MP1 值(E_{MP}^1)为多路径对信号频率 1 的影响

图 6 不同监测环境的 MP1 序列

Fig. 6 MP1 Sequences Under Different Environments

日滤波法提取多路径重复项用于后一天的多路径效应修正(本文采用 db8 小波及硬阈值法进行去噪)。

因为监测距离均较短,本文采用实时动态方法,

利用载波相位双差观测值进行定位。图 9 为坐标系 3 个方向多路径效应修正前后序列对比。从图 9 可以看出,受监测环境植被影响,多路径效应造成坐标

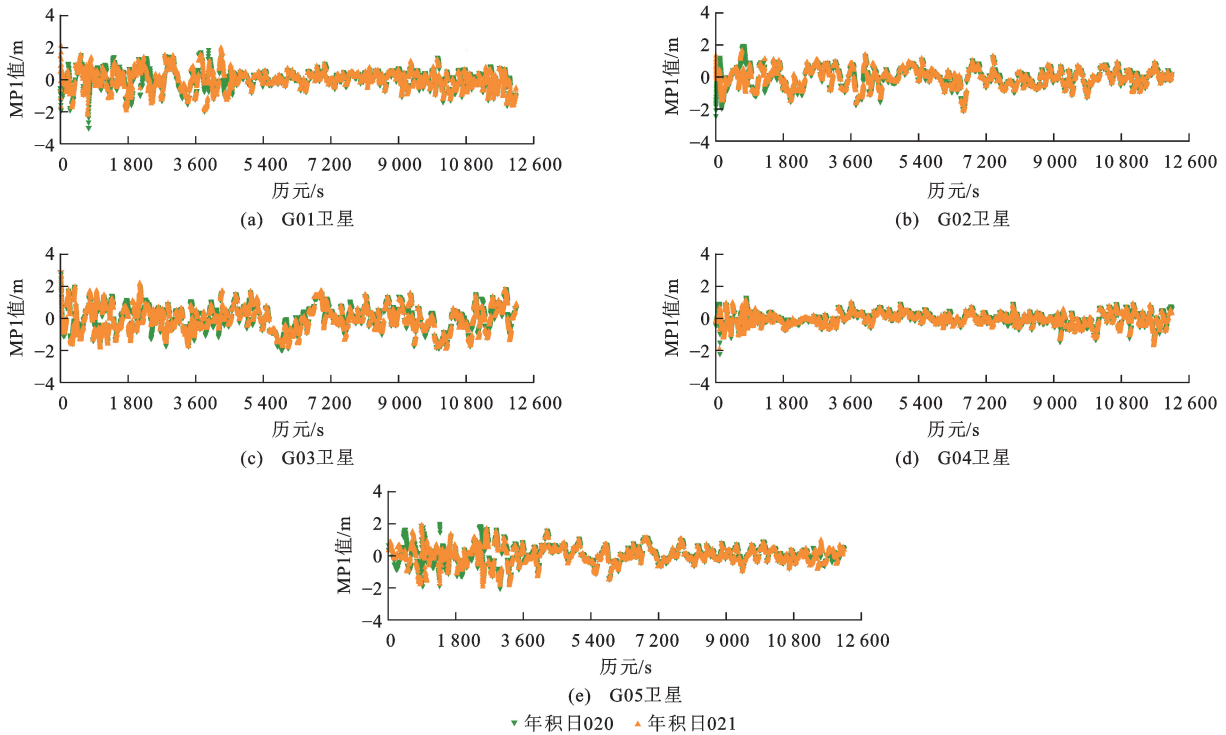


图7 G01~G05 卫星相邻两天 MPI 序列

Fig. 7 MPI Sequences of Satellites G01-G05 in Two Continuous Days

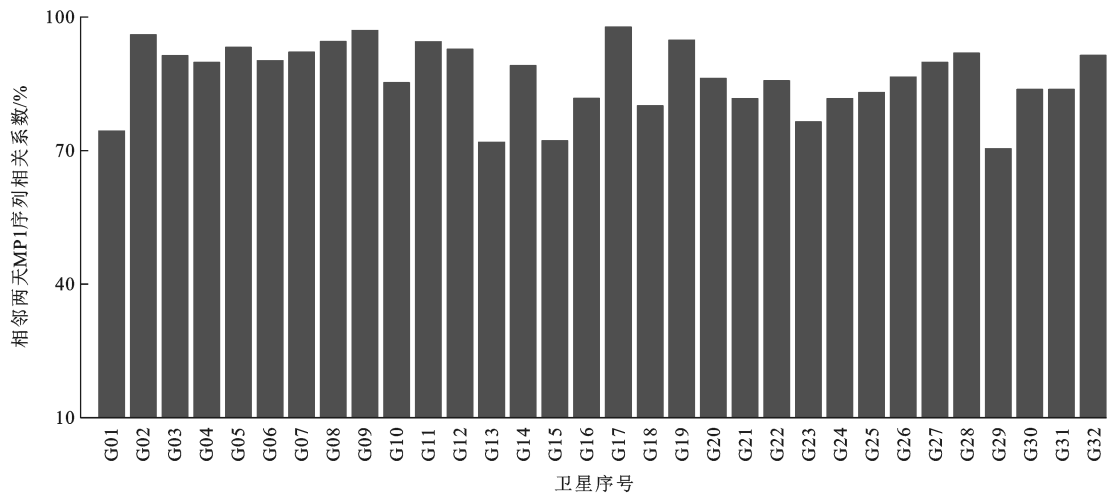


图8 G01~G32 卫星相邻两天 MPI 序列相关系数分布

Fig. 8 Distribution of Correlation Coefficients of MPI Sequences for Satellites G01-G32 in Two Continuous Days

偏差较大,偏差范围为 $-0.05 \sim 0.05$ m。表2为多路径效应修正前后坐标残差均方根统计结果。从表2可以看出,修正后东(E)、北(N)和高程(U)3个方向精度分别提高84.38%、72.88%和64.84%。其中高程方向改善明显,可以满足应急滑坡监测预报预警需求。

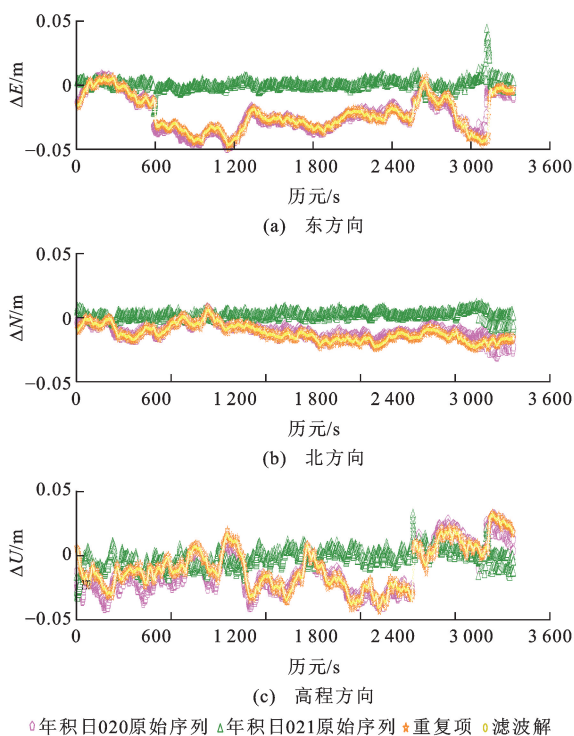
4 结 语

(1)开阔环境监测时,数据处理一般采用单一截止高度角策略减少多路径等对环境因素造成的影响,

但复杂环境GNSS技术用于监测时多路径效应波动较大,不能采取单一截止高度角进行数据处理策略。

(2)与开阔环境相比,复杂环境下多路径效应可达2 m且表现为高频波动,为下一步经验模态提取误差趋势项提供科学依据。

(3)通过小波去噪,对定位结果采用恒星日滤波法进行误差趋势项提取,并用于相邻两天的定位误差实时修正,可使定位残差提高至毫米级,东、北和高程3个方向精度分别提高84.38%、72.88%、64.84%,使复杂环境下的实时GNSS高精度形变监



ΔE 、 ΔN 、 ΔU 分别为东、北和高程 3 个方向的修正前后残差均方根

图 9 多路径效应修正前后序列

Fig. 9 Sequences of Multipath Effect Before and After Correction

表 2 多路径效应修正前后残差均方根统计结果

Tab. 2 Statistical Results of Root Mean Square Residual of Multipath Effect Before and After Correction

参数	修正前/mm	修正后/mm	精度提高/%
ΔE	26.5	4.2	84.38
ΔN	13.4	3.2	72.88
ΔU	19.5	7.7	64.84

测成为可能。

(4)通过两种不同形变监测环境结果对比分析,主要对复杂环境下多路径效应进行了观测,有助于进一步对其产生机理和复杂环境下基于高度角、信噪比因子的环境建模进行深入研究。

参考文献:

References:

[1] 中国地质环境监测院. 全国地质灾害通报[EB/OL]. (2017-05-10)[2018-03-20]. <http://www.cigem.gov.cn/auto/db/explorer.html?db=1006&type=1&fd=16&fv=49&uni=0&md=15&pd=210&mdd=11&pdd=5&msd=11&psd=5&start=0&count=20>. China Institute of Geo-environment Monitoring. National Geological Disaster Report [EB/OL]. (2017-05-10)

[2018-03-20]. <http://www.cigem.gov.cn/auto/db/explorer.html?db=1006&type=1&fd=16&fv=49&uni=0&md=15&pd=210&mdd=11&pdd=5&msd=11&psd=5&start=0&count=20>.

[2] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):1-7.

YIN Yue-ping. Initial Study on the Hazard-relief Strategy of Geological Hazard in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2004,15(2):1-7.

[3] 李亚玲,苏海峰,李铭全. 滑坡监测方法研究综述[J]. 西南公路,2015(4):153-156.

LI Ya-ling, SU Hai-feng, LI Ming-quan. Review of Landslide Monitoring Methods[J]. Southwest Highway,2015(4):153-156.

[4] 刘永丽. BDS/GPS 组合系统的高精度变形监测技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2014.

LIU Yong-li. The Research on High-precision Deformation Monitoring Technology of BDS/GPS Combined System[D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2014.

[5] 李征航. GPS 定位技术在变形监测中的应用[J]. 全球定位系统,2001,26(2):18-25.

LI Zheng-hang. Application of GPS Positioning Technology in Deformation Monitoring[J]. GNSS World of China,2001,26(2):18-25.

[6] 王 利. 地质灾害高精度 GPS 监测关键技术研究[J]. 测绘学报,2015,44(7):826.

WANG Li. A Study on Key Technology High Precision GPS Monitoring for Geological Hazard[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2015,44(7):826.

[7] 王 利,张 勤,范丽红,等. 北斗/GPS 融合静态相对定位用于高精度地面沉降监测的试验与结果分析[J]. 工程地质学报,2015,23(1):119-125.

WANG Li,ZHANG Qin,FAN Li-hong,et al. Experiment and Results of High Precision Land Subsidence Monitoring Using Fused BDS/GPS Data and Static Relative Positioning[J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(1):119-125.

[8] 王 利,张 勤,李寻昌,等. GPS-RTK 技术用于滑坡动态实时变形监测的研究[J]. 工程地质学报,2011,19(2):193-198.

WANG Li,ZHANG Qin,LI Xun-chang,et al. Dynamic and Real Time Deformation Monitoring of Landslide with GPS-RTK Technology[J]. Journal of Engineering Geology,2011,19(2):193-198.

[9] WUBBENA G,BAGGE A,BOETTCHER G,et al. Permanent Object Monitoring with GPS with 1 Millimeter Accuracy[C]// The Institute of Navigation.

- Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2001). Manassas: ION Publications, 2001:1000-1008.
- [10] 陈波. GNSS技术在滑坡应急变形监测中的应用分析[J]. 世界有色金属, 2016(21):122,124.
CHEN Bo. Application and Analysis of GNSS Technology in Landslide Emergency Deformation Monitoring [J]. World Nonferrous Metals, 2016(21):122,124.
- [11] 过静珺, 戴连君, 卢云川. 虎门大桥 GPS(RTK)实时位移监测方法研究[J]. 测绘通报, 2000(12):4-5,12.
GUO Jing-jun, DAI Lian-jun, LU Yun-chuan. Study of Method for Realtime Survey on Humen Bridge by GPS(RTK)[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000(12):4-5,12.
- [12] 范士杰, 郭际明, 彭秀英. TEQC在GPS数据预处理中的应用与分析[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(2):33-35.
FAN Shi-jie, GUO Ji-ming, PENG Xiu-ying. Applications of TEQC to GPS Data Pre-processing[J]. Journal of Geomatics, 2004, 29(2):33-35.
- [13] 汪东, 周宏平, 张慧春, 等. 不同植被GPS定位精度影响因素分析及多路径效应[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11):46-51.
WANG Dong, ZHOU Hong-ping, ZHANG Hui-chun, et al. Influencing Factors Analysis and Multi-path Effects of Different Plant Cover Types on GPS Positioning Accuracy for Forest Fire Control[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34(11):46-51.
- [14] 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. GPS动态变形测量中的多路径效应特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1):65-71.
DAI Wu-jiao, DING Xiao-li, ZHU Jian-jun. Study on Multipath Effect in Structure Health Monitoring Using GPS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(1):65-71.
- [15] 谢世杰, 奚有根. RTK的特点与误差分析[J]. 测绘工程, 2002, 11(2):34-37.
XIE Shi-jie, XI You-gen. Characteristics and Error Analysis of RTK[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2002, 11(2):34-37.
- [16] 袁林果, 黄丁发, 丁晓利, 等. GPS载波相位测量中的信号多路径效应影响研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(3):210-215.
YUAN Lin-guo, HUANG Ding-fa, DING Xiao-li, et al. On the Influence of Signal Multipath Effects in GPS Carrier Phase Surveying[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(3):210-215.
- [17] 张波, 黄劲松, 苏林. 利用信噪比削弱GPS多路径效应的研究[J]. 测绘科学, 2003, 28(3):32-35.
ZHANG Bo, HUANG Jin-song, SU Lin. A Research on Using SNR Values to Mitigate Carrier Phase Multipath in GPS Surveying[J]. Science of Surveying and Mapping, 2003, 28(3):32-35.
- [18] 钟萍, 丁晓利, 郑大伟. CVVF方法用于GPS多路径效应的研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(2):161-167.
ZHONG Ping, DING Xiao-li, ZHENG Da-wei. Study of GPS Multipath Effects with Method of CVVF[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(2):161-167.
- [19] 黄丁发, 丁晓利, 陈永奇, 等. GPS多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(1):36-41.
HUANG Ding-fa, DING Xiao-li, CHEN Yong-qi, et al. Wavelet Filters Based Separation of GPS Multipath Effects and Engineering Structure Vibrations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1):36-41.
- [20] 黄声享, 李沛鸿, 杨保岑, 等. GPS动态监测中多路径效应的规律性研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2005, 30(10):877-880.
HUANG Sheng-xiang, LI Pei-hong, YANG Bao-cen, et al. Study on the Characteristics of Multipath Effects in GPS Dynamic Deformation Monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(10):877-880.
- [21] ESTEY L H, MEERTENS C M. TEQC: The Multipurpose Toolkit for GPS/GLONASS Data[J]. GPS Solutions, 1999, 3(1):42-49.
- [22] KEE C, PARKINSON B W. Calibration of Multipath Errors on GPS Pseudorange Measurements[C]// The Institute of Navigation. Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1994). Manassas: ION Publications, 1994:353-362.
- [23] RADOVANOVIC R S. High Accuracy Deformation Monitoring via Multipath Mitigation by Day-to-day Correlation Analysis[C]// The Institute of Navigation. Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000). Manassas: ION Publications, 2000:35-44.