

文章编号:0253-9993(2010)05-0755-05

GPS/伪卫星技术在露天矿边坡监测中的应用

刘超^{1,2} 高井祥² 王坚² 刘燕³

(1. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院 江苏 徐州 221116; 3. 空军工程大学 电讯工程学院 陕西 西安 710077)

摘要:针对露天矿区 GPS 可视卫星个数和几何图形条件易受到较大坡度的遮挡影响,利用 GPS/伪卫星(PLs)组合定位技术,增强卫星的几何强度。同时,为了削弱非建模系统误差的影响,提出通过经验模态分解(EMD)的多尺度分解与重构结构,依据累积标准化模量的均值随尺幅的变化确定系统误差与噪声分离尺度的选择标准,建立系统趋势分离模型。通过模拟仿真和实验分析表明:选择合适的 PLs 的设站位置, GPS/PLs 组合定位技术可较大程度地改善定位精度因子(DOP);利用 EMD 方法去除非建模系统误差后, GPS/PLs 组合观测值的双差残差序列的系统误差很大程度上得到削弱;可靠性检验指数 F -ratio 和 W -ratio 分别达到 7.79 和 91.83,整周模糊度固定解的可靠性明显增强;基线向量解的精度也得到明显提高, X 、 Y 、 Z 坐标分量的标准差为 0.1、0.1、0.3 mm。

关键词:GPS/伪卫星组合定位;露天矿区;边坡变形;经验模态分解

中图分类号:TD176;P228.4

文献标志码:A

GPS/pseudolites technology for the slope deformation monitoring in open-pit mine

LIU Chao^{1,2} GAO Jing-xiang² WANG Jian² LIU Yan³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Environment Science & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to improve positioning geometry strength and to increase the number of GPS satellites in open-pit mine, integration GPS/Pseudolites (PLs) positioning technology was proposed. However, the un-modeled systematic errors were still the main limiting factors for high precision baseline solution, wherefore the Empirical Mode Decomposition (EMD) theory was employed to eliminate the error. The multi-scale decomposition and reconstruction architecture were defined here on the basis of the EMD theory and the systematic error mitigation model was demonstrated as well. A standards of the scale selection for the systematic error elimination was given in terms of the mean of the accumulated standardized modes. Thereafter, the scheme of the GPS/PLs baseline solution based on the EMD was suggested. The simulation and experiment results show that the Dilution of Precision (DOP) are reduced greater degree when PLs is located suitable and the reliability of ambiguity resolution is dramatically improved with the reliability indices F -ratio and W -ratio reach 7.79 and 91.83 after systematic error eliminated. The proposed scheme dramatically improves the precision of baseline vector, standard deviation in X , Y , Z are 0.1, 0.1, 0.3 mm respectively.

Key words: integration of GPS/pseudolites; open-pit mine; slope deformation; empirical mode decomposition

提高边坡角是露天矿区充分回收资源、降低生产成本、增加矿山效益的重要手段之一,但同时滑坡灾害发生的可能性大大增加,通过测量手段对边坡进行

实时的变形监测,及时发现自然因素及人为因素引发的变形,利用一定的数据处理方法进行分析 and 预报预警变得至关重要^[1]。全站仪、水准仪及测量机器人

收稿日期:2009-10-03 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40774010、40904004);教育部博士点基金资助项目(200802900501、200802901516)

作者简介:刘超(1985—),男,陕西蒲城人,博士研究生。E-mail:celianglang@163.com

等传统观测技术在实践中得到了广泛的应用,但易受到气候、通视等条件的影响。作为一种全新的测量技术, GPS 克服了传统测量技术的众多缺陷,在变形监测中得到了很好的应用^[2-3];但露天矿边坡坡度较大,可视卫星的数量和几何分布受到了一定的制约,影响了 GPS 定位的精度、可靠性甚至其可行性。伪卫星(PLs)技术的提出为这一问题的解决提供了一条有效的途径^[4]。伪卫星可以通过布设在地面上的定位信号发射器,发射类似 GPS 的信号,以改善 GPS 卫星的几何结构;GPS/PLs 组合定位技术,可以增加可视卫星的个数,有效地改善几何图形结构,提高定位精度^[4-5]。文献[6-7]对伪卫星的主要误差进行了一些有益的研究,但 GPS 卫星多路径误差以及建模残余的系统误差仍然是影响高精度基线解算的一个重要因素。本文引入经验模态分解理论(EMD),从双差残差序列中分离出系统误差,并用来修正双差观测值,重新进行基线解算。

1 理论分析

1.1 定位精度因子

精度因子(DOP)是卫星星座定位的几何强度的量化测量方法。通过方向余弦矩阵可计算出精度因子的不同表示方式,文献[8]对此进行了详细的阐述。根据需要可定义不同类型的 DOP,如 X、Y 方向的精度因子 XDOP、YDOP,以及平面、高程、空间、几何精度因子 HDOP、VDOP、PDOP、GDOP。GPS 的定位误差通过测量值误差估算获得,即 $m_p = \text{DOP}m_\sigma$,其中 m_p 为位置误差; m_σ 为测量误差。

根据参考文献[9],高程精度因子 $\text{VDOP} \geq [\sqrt{N} \sin^2(\theta/2)]^{-1}$,其中 N 为卫星个数; θ 为最低卫星的天顶角。考虑到露天矿区边坡较高、以及对流层延迟与多路径误差的影响,高度角小于一定角度的 GPS 卫星通常被舍弃或者无法接收到其发射的信号,导致 GPS 定位精度较差,特别是高程方向。伪卫星布设方法灵活,高度角一般较小,其可以很好的弥补 GPS 定位技术的不足,提高定位的精度。

1.2 GPS/伪卫星组合定位

从定位的角度来看,伪卫星可被认为是设置在地面上、发射类似 GPS 信号的卫星,因此精密 GPS 定位理论可以被应用于组合 GPS/PLs 定位技术。单差伪卫星载波相位观测值为

$$\Delta\varphi^{\text{PL}}\lambda = \Delta\rho^{\text{PL}} + \Delta N^{\text{PL}}\lambda + c\Delta\delta t_{\text{R1}}^{\text{PL}} - c\Delta\delta t_{\text{R2}}^{\text{PL}} + \Delta\delta_{\text{orb}}^{\text{PL}} + \Delta\delta_{\text{iono}}^{\text{PL}} + \Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}} + \Delta\varepsilon_{\varphi}^{\text{PL}} \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi^{\text{PL}}$ 为单差载波相位值; λ 为载波相位观测值波长; $\Delta\rho^{\text{PL}}$ 为两接收机之间单差几何距离; ΔN^{PL} 为

单差整周模糊度; c 为光速(取 299 792 458 m/s); $\Delta\delta t_{\text{R1}}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\delta t_{\text{R2}}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\delta_{\text{orb}}^{\text{PL}}$ 和 $\Delta\delta_{\text{iono}}^{\text{PL}}$ 分别为卫星钟差、接收机钟差、卫星位置误差和对流层延迟误差; $\Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\varepsilon_{\varphi}^{\text{PL}}$ 分别为多路径误差和随机噪声。

单差 GPS 载波相位观测值为

$$\Delta\varphi\lambda = \Delta\rho + \Delta N\lambda + c\delta t_{\text{R1}} - c\Delta\delta t_{\text{R2}} + \Delta\delta_{\text{orb}} + \Delta\delta_{\text{trop}} + \Delta\delta_{\text{iono}} + \Delta\delta_{\text{mp}} + \Delta\varepsilon_{\varphi} \quad (2)$$

式中, $\Delta\delta_{\text{iono}}$ 为电离层延迟误差。

虽然伪卫星的观测方程和 GPS 观测方程相似,但主要误差源的特征与 GPS 是不同的。由于伪卫星的发射器固定在地面上,通常事先利用传统的测量手段对伪卫星的位置进行精确的测量;由于伪卫星的布设高度较小,观测值不受电离层误差影响;而对流层误差和多路径误差的影响会比较严重,对流层延迟最大可以达到 320.5×10^{-6} ^[10]。对于较短距离的基线,在 GPS 以及伪卫星站间求载波相位观测值单差,可以较好的削除 GPS 对流层的延迟误差,伪卫星对流层延迟误差也得到了一定程度上的削弱。

由于 GPS 卫星不断运动,其多路径误差表现出较强的周期性;但是伪卫星发射器设置在固定的位置,若周围环境不变,其多路径的影响可以认为是常量。可以将多路径误差视为未知数 $\Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}}$ ^[7],进行 GPS/PLs 组合基线解算为

$$\begin{cases} V_1 = A_1\delta X_r + B_1\nabla\Delta N_1 + C\Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}} + L'_1 \\ V_2 = A_2\delta X_r + B_2\nabla\Delta N_2 + L'_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中,参考卫星为 GPS 卫星, V_1 为包含伪卫星的双差观测值; V_2 为 GPS 双差观测值; A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 为系数矩阵; δX_r 为坐标改正向量; $\nabla\Delta N_1$ 、 $\nabla\Delta N_2$ 为载波相位双差整周模糊度; C 为 n 维单位矩阵,伪卫星的多路径效应值 $\Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}} = [\Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL1}} \quad \Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL2}} \quad \cdots \quad \Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PLn}}]^T$; L'_1 、 L'_2 为载波相位观测值残差向量。

伪卫星多路径效应求解的主要步骤:① 选择参考卫星,利用 GPS/PLs 观测数据,建立双差观测方程,不考虑伪卫星多路径影响求解双差整周模糊度浮点解,并利用 LAMBDA 方法进行整周模糊度的固定;② 将得到的整周模糊度固定解作为已知值,考虑伪卫星多路径影响,重新进行基线解算,可以求得伪卫星的多路径单差未知值^[6]。

1.3 经验模态分解

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD^[11])是一种新的时频分析工具,该方法属一种自适应的局部时频分析方法,它根据信号自身的特性将信号分解成有限个经验模量函数,特别适合非平稳信号的分析^[11-13]。

EMD 算法基本步骤:① 求信号在 $x(t)$ 的极值点;

② 分别由极小值点与极大值点得包络线 $e_{\min}(t)$ 和 $e_{\max}(t)$; ③ 计算上下包络的平均值 $m(t) = [e_{\min}(t) + e_{\max}(t)]/2$; ④ 提取细节 $d(t) = x(t) - m(t)$; ⑤ 重复细节 $d(t)$ 进行①~④步骤,直到 $d(t)$ 为零均值,此时得到的 $d(t)$ 即为一个 imf; ⑥ 计算残差 $m(t) = x(t) - \text{imf}_i(t)$; ⑦ 重复运算直到残差不含 imf 函数。

定义 EMD 求取 imf 的算子与求取残差算子分别为 $F_{\text{imf}}(\cdot)$ 与 $F_{\text{residual}}(\cdot)$, 则这 2 个算子定义了类似高频滤波与低频滤波的过程。对低频部分可以继续分解,从而实现多尺度的分解过程。重构式为

$$m_i(t) = F_{\text{imf}}^{-1}(\text{imf}_{i+1}(t)) + F_{\text{residual}}^{-1}(m_{i+1}(t)) \quad (4)$$

式中, $F_{\text{imf}}^{-1}(\cdot)$ 和 $F_{\text{residual}}^{-1}(\cdot)$ 分别表示 $F_{\text{imf}}(\cdot)$ 与 $F_{\text{residual}}(\cdot)$ 的逆过程。

使用 EMD 进行信号趋势项提取时,定义按尺度标准化模量的累积均值^[14]为

$$\hat{h}_m = \text{mean} \left\{ \sum_{i=1}^m [\text{imf}_i(t) - \text{mean}(\text{imf}_i(t)) / \text{std}(\text{imf}_i(t))] \right\} \quad (5)$$

其中, $\text{imf}_i(t)$ 是第 i 尺度的模量; $\text{mean}(\cdot)$ 为均值函数; $\text{std}(\cdot)$ 为标准差。如果 $\hat{h}_m$ 偏离零值,则从尺度 m 开始认为是系统的趋势变化所致。从信号中提取的趋势项可由下式给出,即

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=m}^n \text{imf}_i(t) + r_n(t) \quad (6)$$

其中, $\hat{x}(t)$ 为提取的趋势项; $r_n(t)$ 为信号 $x(t)$ 分解的残余量。

1.4 基于 EMD 的 GPS/PLs 的基线解算模型

由式(3)可得 GPS/PLs 组合基线解算模型为

$$\nabla \Delta L_1 = \nabla \Delta \rho_1 + \lambda \nabla \Delta N_1 + \Delta \delta_{\text{mp}}^{\text{PL}} + \nabla \Delta V_{\text{sys1}} + \nabla \Delta V_{\sigma1} \quad (7)$$

$$\nabla \Delta L_2 = \nabla \Delta \rho_2 + \lambda \nabla \Delta N_2 + \nabla \Delta V_{\text{sys2}} + \nabla \Delta V_{\sigma2} \quad (8)$$

式(7)为 GPS/PLs 的双差观测值方程,其中, $\nabla \Delta L_1$ 为双差观测值(包含伪卫星观测值); $\nabla \Delta \rho_1$ 为卫星与接收机之间的距离双差值; λ 为载波相位观测值波长; $\nabla \Delta N_1$ 为双差整周模糊度; $\Delta \delta_{\text{mp}}^{\text{PL}}$ 为伪卫星单差多路径效应误差; $\nabla \Delta V_{\text{sys1}}$ 为双差残差的趋势项; $\nabla \Delta V_{\sigma1}$ 为随机噪声;式(8)为 GPS 的双差观测值方程。

基于 EMD 趋势项的提取算法,提出基于 EMD 方法的 GPS/PLs 的基线解算模型:首先对伪卫星载波观测值进行对流层和多路径的改正,然后进行 GPS/PLs 组合基线解算,得到双差观测值的残差序列;通过 EMD 方法进行系统趋势项的提取,利用提取的系统趋势项对双差载波相位观测值进行修正,重新进行

基线向量的求解,包括:整周模糊度浮点解的求解、LAMBDA 方法双差整周模糊度的固定以及基线向量的求解;通过有效性检验评价基线解的可靠性,并计算残差序列,评价 EMD 方法系统误差消除效果。

2 仿真实验及实例分析

2.1 GPS/PLs 定位精度因子仿真分析

为了分析由于较高边坡遮挡、卫星分布条件不佳的情况下,加入伪卫星对 GPS 定位精度的影响,采用不同的 DOP 值作为评价指标。模拟某露天矿区卫星遮挡情况,其可视卫星分布如图 1(a)所示,时段内始终保持跟踪 4 颗卫星(卫星编号分别为 6、15、17、22),采样间隔为 1 s,采集长度为 400 个历元;表 1 给出了此时段单独 GPS 系统的不同 DOP 值(时段平均),由于卫星分布较为集中,且高度角较高,其 DOP 值明显偏大,PDOP 值更是达到了 9.272,使得单独 GPS 系统的精度受到严重影响;为了提高 GPS 的定位精度,寻求最优化的伪卫星布设方案,研究不同数量以及在不同方位布设伪卫星对定位精度的影响,分别在方位角为 15、80、185、265°,高度角为 5°的 4 个位置布设伪卫星 PL1、PL2、PL3、PL4(图 1(a))。

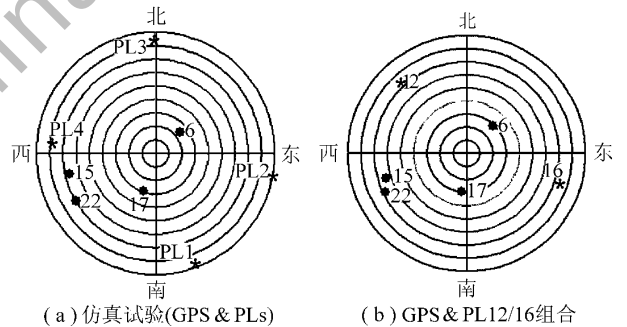


图1 基准站卫星 GPS & PLs 空间分布

Fig. 1 Satellites (GPS & PLs) space distribution of base station

不同布设方案得到的 DOP 值(时段平均)见表 1: ① 在伪卫星加入后,精度因子值都有不同程度的减小,且随着伪卫星数目的增加,其值越小; ② 加入一颗伪卫星,精度因子值得到了较大程度的减小,但可靠性较差,GPS + PL2 方案和 GPS + PL3 方案效果不佳; ③ 加入 2 颗伪卫星,精度因子值进一步减小且可靠性明显增强,GPS + PL2&4 相对为最优; ④ 加入更多的伪卫星,其精度因子值仍有一定程度的减小,但考虑到经济效益的最大化以及边坡稳定性监测的精度设计要求,增加伪卫星个数的意义不大,故本文以 GPS + PL2&4 方案为模板,遵照“同侧布设”的原则以减少伪卫星位置误差的影响,同时根据现场条件进行伪卫星的布设。

表 1 不同组合方案的 DOP 值

Table 1 DOPs based on different integrate schemes

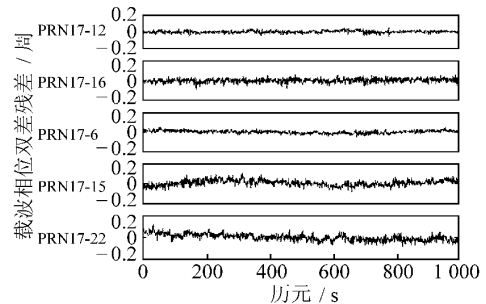
组合方案	DOP					
	XDOP	YDOP	VDOP	HDOP	PDOP	GDOP
GPS	4.258	7.483	3.442	8.610	9.272	11.169
GPS + PL1	0.838	1.651	1.976	1.851	2.708	2.842
GPS + PL2	3.572	6.292	3.437	7.235	8.010	9.862
GPS + PL3	2.939	4.848	1.733	5.670	5.928	6.787
GPS + PL4	1.012	1.019	2.089	1.436	2.535	2.667
GPS + PL1&2	0.740	1.112	1.289	1.336	1.856	2.035
GPS + PL1&3	0.620	1.644	1.569	1.757	2.355	2.440
GPS + PL2&3	2.372	3.273	1.655	4.042	4.368	5.169
GPS + PL2&4	0.994	0.670	1.268	1.199	1.745	1.841
GPS + PL1&2&3	0.594	1.045	1.116	1.202	1.640	1.759
GPS + PL1&2&4	0.736	0.651	1.248	0.983	1.589	1.666
GPS + PL1&3&4	0.581	0.895	1.455	1.067	1.805	1.870
GPS + PL1&2&3&4	0.577	0.650	1.116	0.869	1.414	1.478

2.2 实例分析

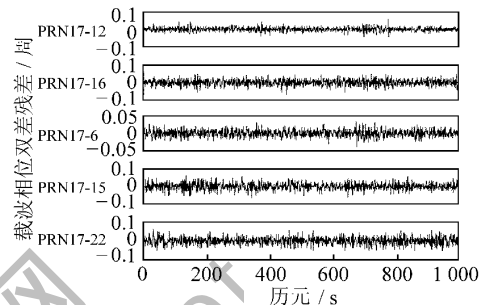
采用 2 台 NovAtel RT2 GPS 接收机和 2 台 Integrinautics IN200CXL 伪卫星发射装置 2000-12-20 在澳大利亚新南威尔士进行数据采集,基准站(BASE)和监测站(ROVE)相距 10.18 m。基准站伪卫星和 GPS 卫星的分布如图 1(b)所示。2 台伪卫星的卫星号分别为 12 和 16,伪卫星仅发射 L_1 载波相位,加入伪卫星后,DOP 值均有不同程度的减小,其中 PDOP 值(测段均值)仅为 1.675,较单独 GPS 系统(9.272)明显减小。为了防止信号之间的干扰及远近效应,脉冲发射的占空比设置为 10%,信号的衰减值为 32 dB。采集数据长度为 120 min,采样间隔 1 s,截取 1 000 历元进行试验分析,伪卫星和测站的位置事先精密测得。

选择 PRN17 作为参考卫星,建立载波相位观测值的双差方程,组成 5 组双差观测值 PRN17-12、PRN17-16、PRN17-6、PRN17-15、PRN17-22 进行基线解算,得到其残差序列并从中提取站间单差伪卫星多路径效应值,PL12 和 PL16 的多路径效应值分别为 0.236 36 和 0.109 51 周;去除伪卫星多路径效应后的双差观测值的残差序列如图 2(a)所示,不难看出,其残差序列仍存在较明显的系统误差。

采用经验模态分解分离残差序列的系统误差和随机噪声。以 PRN17-16 为例说明分离过程,对 PRN17-16 的双差观测值残差序列进行 9 个尺度的分解,得到 9 个模量和 1 个趋势项(图 3)。利用标准化模量的累计均值与尺度的关系选择尺度 5 为分离尺度,进行系统误差的分离,同样的方法可以对其他双差观测值残差序列进行系统误差分离。利用提取的系统误差修正原始双差观测值,并重新进行整周模



(a) 去除伪卫星多路径后



(b) EMD 去除系统误差后

图 2 双差观测值残差序列

Fig. 2 DD residuals series

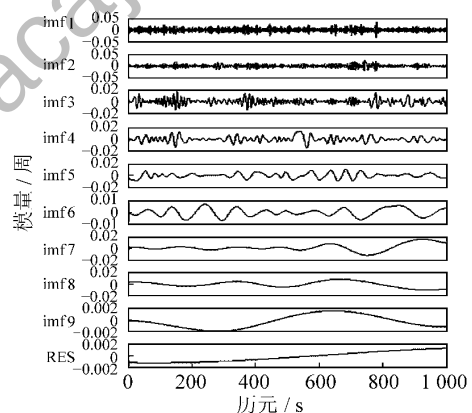


图 3 PRN17-16 双差观测值残差序列 EMD 多尺度分解

Fig. 3 Multi-scale EMD decomposition of PRN17-

16 DD residuals series

糊度的固定和基线的解算,得到重新计算后的双差观测值残差序列(图 2(b)),与去除系统误差前(图 2(a))残差比较,表现出较强的随机性,系统误差得到了明显的削弱。计算系统误差去除前后的 F -ratio 值和 W -ratio 值见表 2,比较双差整周模糊度固定的可靠性,系统误差去除后 F -ratio 值和 W -ratio 值均得到了明显的提高,同时通过表 2 可以看出,GPS/PLs 组合进行整周模糊度求解的可靠性明显高于单独的 GPS 系统。

表 3 给出了单独 GPS 系统、GPS/PLs 组合、去除 PLs 多路径后、去除系统误差后计算得到的基线向量;通过事先精确测得的测站坐标,得到基线向量的测量值,列于表中。系统误差去除后的基线向量 X 、

表 2 整周模糊度求解的有效性比较
Table 2 The validation comparison of the ambiguity resolution

可靠性 指数	单独 GPS	GPS/PLs 组合	去除 PLs 多路径后	去除系统 误差后
F-ratio	1.32	3.12	3.03	7.79
W-ratio	10.61	34.04	32.53	91.83

Y、Z 三个方向上的标准差分别为 0.1、0.1、0.3 mm , 较去除前明显减小,精度显著提高。

3 结 论

针对露天矿区边坡变形监测中 GPS 卫星容易受到遮挡影响,利用 GPS/PLs 组合定位技术,增加可视卫星的数量,增强几何图形强度,提高定位的精度;通

表 3 不同方案求解的基线向量比较
Table 3 Comparison of the baseline solution based on different schemes

坐标	单独 GPS/m (标准差/mm)	GPS/PLs 组合/m (标准差/mm)	去除 PLs 多路径后/m (标准差/mm)	去除系统误差后/m (标准差/mm)	测量值/m
X	1.980(0.7)	1.941(0.7)	1.973(0.8)	1.972(0.1)	1.969
Y	-6.762(0.4)	-6.686(0.8)	-6.743(0.8)	-6.742(0.1)	-6.749
Z	-7.356(1.1)	-7.380(1.4)	-7.363(1.4)	-7.363(0.3)	-7.367

过仿真实验,对精度因子、经济效益、现场条件等进行分析,建立了方案设计的基本准则。针对 GPS/PLs 组合定位技术中复杂的非建模系统误差,通过定义的经验模态分解的多尺度结构,提出了非建模系统误差的分离模型,给出了基于经验模态分解的 GPS/伪卫星基线解算模型;通过实测数据计算和分析,证明了该模型可以较好地消除非建模系统误差的影响,提高基线解算的精度和可靠性。

参考文献:

[1] 张安兵,高井祥,刘新侠,等.边坡变形时序非线性判定及混沌预测研究[J].中国安全科学学报,2008,18(4):55-60.
Zhang Anbing,Gao Jingxiang,Liu Xinxia,et al. Nonlinear test and chaotic prediction of slope deformation sequences[J]. China Safety Science Journal,2008,18(4):55-60.

[2] 贾晓娟,钱兆明.GPS 技术在安太堡露天矿边坡变形监测中的应用[J].煤炭科学技术,2008,36(6):90-94.
Jia Xiaojuan,Qian Zhaoming. Application of GPS technology to monitor sideslope deformation in reserved area of antaibao surface mine[J]. Coal Science and Technology,2008,36(6):90-94.

[3] 罗周全,邱灿红.GPS-RTK 技术及其在露天矿边坡位移监测中的应用[J].地下空间与工程学报,2005,1(7):1 058-1 064.
Luo Zhouquan,Qiu Canhong. GPS-RTK technology and its application to slope displacement monitoring in open pit mines[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2005,1(7):1 058-1 064.

[4] Wang J,Tsujii T,Rizos C,et al. GPS and pseudo-satellites integration for precise positioning[J]. Geomatics Research Australasia,2001,74:103-117.

[5] Lemaster E,Rock S. Mars exploration using self-calibrating pseudo-lite arrays[A]. Proc. 12th International Technical Meeting of the

Satellite Division of the US Institute of Navigation[C]. Nashville,1999:1 549-1 558.

[6] 何秀凤.变形监测新方法及其应用[M].北京:科学出版社,2007.

[7] 杨光.GPS 和伪卫星组合定位技术及其在形变监测中的应用研究[D].南京:河海大学,2004.
Yang Guang. Integrated GPS and pseudolite psditiioning for deformation monitoring system[D]. Nanjing:Hohai University,2004.

[8] Kaplan E D. Understanding GPS:principles and applications[M]. Boston:Artech House Publishers,1996.

[9] 邓强,黄顺吉.基于伪卫星的提高 GPS 垂直定位精度的研究[J].电子学报,1997,25(3):70-73.
Deng Qiang,Huang Shunji. Study on improving GPS vertical positon-ing accuracy using pseudolite[J]. Acta Electronica Sinica,1997,25(3):70-73.

[10] Hein G W,Eissfeller B,Werner W,et al. Practical investigations on DGPS for aircraft precision approaches augmented by pseudolite carrier phase tracking[A]. Proc 10th International Technical Meet-ing of the Satellite Division of the US Institute of Navigation[C]. Kansas City,1997:1 851-1 960.

[11] Huang N E,Shen Z,Long S R,et al. The empirical mode decompo-sition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[A]. Proc. R. Soc. Lond. A[C]. London,1998,454:903-995.

[12] Yu D J,Cheng J S,Yang Y. Application of EMD method and Hil- bert spectrum to the fault diagnois of roller bearings[J]. Mechan- ical Systems and Signal Processing,2005,19:259-270.

[13] Coughlin K T,Tung K K. 11-year solar cycle in the stratosphere ex- tracted by the empirical mode decomposition method[J]. Advances in Space Research,2004,34:323-329.

[14] Wang J,Wang J L,Roberts C. Reducing GPS carrier phase errors with EMD-wavelet for precise static positioning[J]. Survey Re- view,2009,41:152-161.