

GPS 单历元阻尼 LAMBDA 算法 在水库形变监测中的应用*

刘根友 郝晓光

(中国科学院测量与地球物理研究所,武汉 430077)

摘要 形变监测点近似坐标的概略精度指标为 GPS 单历元定位提供了有利条件,结合水库形变监测点形变特征,采用平滑处理方法,“GPS 单历元阻尼 LAMBDA 算法”可用于静态形变测量,这就将以往的“静态监测模式”与“动态监测模式”统一为“动静态监测模式”。采用模拟实验和清江隔河岩大坝实测数据检验了“动静态模式”的有效性,结果表明:单历元定位精度优于 2 cm,两小时观测数据的平滑坐标可以达到 3 mm 的定位精度。同时讨论了具有两个基准站的数据处理方法,比较了单基准站与双基准站对监测点定位精度的影响。

关键词 水库形变监测 GPS 单历元定位 阻尼 LAMBDA 方法 动静态监测模式 精度
中图分类号:P227 **文献标识码**:A

DAMPED LAMBDA ALGORITHM OF SINGLE EPOCH GPS POSITIONING FOR RESERVOIR-INDUCED DEFORMATION MONITORING

Liu Genyou and Hao Xiaoguang

(Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077)

Abstract The accuracy of approximate coordinates of deformation station provides useful constraint condition for single epoch GPS positioning. Utilizing the characteristic of deformation at the stations and smoothing approach makes the “damped LAMBDA algorithm for single epoch GPS positioning” suitable for statically deformation monitoring. Consequently, two kinds of processing mode including “static monitoring mode” and “kinematic monitoring mode” are unified into a “static and kinematic monitoring mode”. The effectiveness of new method is tested by following two experiments: simulative deformation observing and GPS surveying on Geheyan Dam. The experiment results indicates that real time epoch positioning accuracy is better than 2 cm, and smoothing coordinates of observations for 2 hours can reach the level of 3 mm. The processing approach with two fiducial stations is discussed, and the influences on the positioning accuracy by use of single fiducial station or double stations are compared.

Key words:reservoir deformation monitoring, single epoch GPS positioning, damped LAMBDA algorithm,static and kinematic monitoring mode,accuracy

收稿日期:2004-02-24

基金项目:地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金资助;科技部2002年公益研究专项(国科发财字[2002]484号);长江三峡工程开发总公司2003年专项资助项目(CT-03-07-02)“长江三峡水库诱发地震监测研究”

作者简介:刘根友,男,1967年生,副研究员,主要从事GPS形变分析和算法研究

1 引言

在大型水库区,蓄水易使沿岸古滑坡复活和大坝发生形变,如 1998 年特大洪水期间,隔河岩大坝的形变量达到 18 mm^[1]。及时监测滑坡和大坝的形变对大坝的安全运行和水库诱发滑坡等地质灾害的预报具有重要意义。过去对滑坡的监测主要采用常规的边角网观测手段,很难实现实时监测,而且在滑坡形变剧烈期间对观测人员的安全构成威胁。GPS 具有全天候、高精度、自动化程度高等特点,已开始用于各类大坝和滑坡形变监测。为了保证观测精度,目前主要采用静态定位方法,但该方法一般需要几十分钟到几个小时才能获取一次形变信息,这在形变或位移速度较快时满足不了真正实时监测的要求。

单历元定位是一种 GPS 动态定位方法,主要用于中短基线,基线长度从几十米至十多千米,其特点是仅利用一个历元的观测数据确定整周模糊度,一旦获得模糊度就可以获得该历元时刻待定点的精确坐标。单历元定位成功的前提是要求具有较高精度的近似坐标,对于单频 GPS 接收机,一般要求近似坐标达到分米级精度,双频接收机可以放宽到 2 m^[2,3],大多数形变监测点的形变量都在几个毫米到几个厘米之间,使得单历元定位应用成为可能。陈永奇在 1998 年开展了单历元定位方法用于变形监测的研究^[4]。熊永良等针对特殊方向的形变给出一种模糊度搜索的方案,他们的算法中只利用 PDOP 最小的 4 颗或 5 颗卫星进行计算,其中一个重要原因就是为减少模糊度搜索时间^[4,5]。徐绍铨等在清江隔河岩大坝上建立了 GPS 自动化监测系统,并对三峡库区、龙羊峡水库的个别滑坡进行了 GPS 监测实验,这些滑坡监测主要还是以静态或快速静态 GPS 测量方法为主^[6]。

在单历元模糊度解算方面,目前主要采用传统的模糊度搜索,即给出模糊度的候选空间,逐一计算模糊度组合的观测残差,按最小残差平方和原则固定模糊度。这种方法在形变很小时(如几厘米)是比较成功的。当滑坡形变剧烈时(如几十厘米)这种搜索方法往往需要大量的计算时间,不适合实时形变监测。1995 年,荷兰 Teunissen 针对快速静态定位提出一种非常有效的模糊度搜索方法——LAMBDA 方法^[7]。但是单历元载波相位观测的法方程是秩亏的,单纯的 LAMBDA 方法无能为力。作者基于监测点概略精度指标(坐标约束)的条件提出了“单历元定位的阻尼 LAMBDA 方法”,该方法解决了 GPS 单历元定位的法方程秩亏问题,计算速度

快,应用范围广,在用于变形观测时,相位模糊度搜索的正确率可以达到 100%^[2]。对于类似大坝、滑坡这种只有几个毫米到几个厘米变形的特殊情形,采用单频 GPS 接收机也能获得正确的模糊度。在模糊度解算正确的条件下,单历元定位的精度只依赖于当前观测历元的相位观测精度。从静态定位的残差分析,由于受对流层和多路径残差的影响,双差观测值的观测精度一般为 1 至 3 cm,使得单历元定位本身的精度一般只能达到 5 至 20 mm 的精度,因此,要检测出毫米级的形变量还需要采取相应的对策,而本文采用的平滑处理方案则提供了一种有效的尝试。

2 阻尼 LAMBDA 方法的基本原理

在 GPS 短基线处理时,一般采用双差观测值,双差可以基本消去电离层延迟误差、对流层延迟误差、接收机钟差和卫星钟差。某一历元 $n+1$ 颗观测卫星的双差误差方程可简写为

$$V_{n \times 1} = A_{n \times 3} X + B_{n \times n} Y - L_{n \times 1}, \quad P_{n \times n} \quad (1)$$

式中, X 为坐标未知数(3 个), Y 为模糊度未知数(n 个), A 、 B 为相应的系数, L 为双差观测值减计算值, P 为双差观测值的权阵,当双差组合取相邻卫星相减时,权阵的元素为^[8]

$$P_{ij} = \frac{(n+1-i)j}{(n+1) \sigma_0^2}, \quad i \geq j \quad (2)$$

其中, σ_0^2 为单差观测方差。

在近距离测量中,当采用双频 GPS 接收机时,将 L_1 和 L_2 同时作为观测值处理, L_2 的观测方程系数与 L_1 相同, L_2 的单位权中误差取为 L_1 的 1.3 倍。

由双差观测方程(1)组成的法方程为:

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P L \\ B^T P L \end{bmatrix} \quad (3)$$

因为未知数的个数大于观测方程的个数,单历元的法方程(3)肯定是秩亏的,法方程矩阵不存在凯莱逆。而 $A^T P A$ 和 $B^T P B$ 为满秩矩阵,且非病态矩阵。

在最优化方法中,为了解法方程的病态问题,通过适当加大矩阵主对角元素可以改善法方程的条件数,这种算法称为阻尼最小二乘法。此时的阻尼因子是坐标先验的权阵 P_X ,可由待定点的坐标约束(近似坐标精度)获得。方程(3)转化为

$$\begin{bmatrix} A^T P A + P_X & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P L \\ B^T P L \end{bmatrix} \quad (4)$$

坐标约束实质上给出了坐标初始值的精度,设为

(x, y, z)。高精度的相位测量单位权方差 σ_0^2 可设为 4 mm^2 , 可求出 P_X :

$$P_X = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sigma_0^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{\sigma_0^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{\sigma_0^2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

在法方程(4)的基础上运用 LAMBDA 方法搜索模糊度,我们称之为阻尼 LAMBDA 方法。在形变监测或极低动态定位时,待求点的坐标近似值一般可以预测到 0.5 m 以内的精度,如没有其它约束, x, y, z 方向上的中误差可同时定义为 0.5 m ,根据(5)式计算出权阵。在高动态定位时,如车辆和飞机的动态定位,近似坐标可以利用伪距(相位平滑伪距)差分或卡尔曼滤波方法获得。大量实际计算表明,在一般情况下,只有当坐标约束小于 1 m 时,利用阻尼 LAMBDA 方法才可以获得精确的坐标结果,如果使用双频观测数据,采用伪距差分的近似坐标也是可行的。

3 多基准站的情况

文献[9]中的单基线静态处理结果表明,由于卫星星座的方向误差,使得隔河岩两个稳定点之间也存在相对位移,文中采用整体平差的方法加以克服。其实,除了系统误差外,还有偶然误差无法消除,稳定点之间的坐标变化还受 GPS 定位本身精度的影响。本文采用多基准站处理方法,将两个稳定点完全固定,二者虽然处理方法不同,其本质基本一致。对于两个或多个基准站的情况,只需要将观测方程

(1) 扩展为

$$\begin{cases} V_1 = A_{n_1 \times 3} X + B_{n_1 \times n_1} Y_1 - L_1 \\ V_2 = A_{n_2 \times 3} X + B_{n_2 \times n_2} Y_2 - L_2 \\ \dots \end{cases}, \quad P = \text{diag}(P_1) \quad (6)$$

式中, Y_1, Y_2, \dots 分别是观测卫星对应于不同基站的双差模糊度,在近距离观测时,各条基线的观测卫星数一般是相同的($n_1 = n_2$),但在峡谷地区,如隔河岩大坝的 GPS 观测中则可能出现各个测站的观测卫星数不尽相同的情况,此时 P_i 的形式与(2)式相同。按这种处理模式,尽管没有改变观测卫星的结构,却相当于增加了观测卫星数,有可能提高单历元定位的精度,同时也削弱了上述系统误差。随后的法方程组成和模糊度搜索完全与单基线相同,只是增加了模糊度的个数。

4 观测值随机误差模型精化

单历元定位成功必须具备两个前提,一是要有

高精度的载波相位观测值,二是要求一定精度的坐标约束。单历元定位方法不受观测过程中周跳的影响,也具有一定的抵抗粗差的能力,当粗差正好在整周附近时对定位精度没有影响,而对于 0.5 周左右的偶然误差,反映较为强烈,如果该历元所有观测卫星的相位观测值都存在较大的偶然误差时,有时甚至可能导致单历元模糊度搜索失败(除非已经固定了模糊度^[31])。由(2)式定义的双差观测权阵是将所有单差观测值作为等权考虑的,事实上,由于每颗卫星观测高度角不同,大气传播误差也不同,一般而言,低高度角的信号误差比高高度角信号误差要大,但忽略这些区别一般也不会影响单历元模糊度搜索。为了提高单历元定位精度,应进一步考虑不同卫星的相位观测值权重。在 GPS 单历元定位中,一方面要求观测卫星数越多越好,另一方面又不能容许太大的偶然误差存在。通过精化观测值的随机模型,给出不同卫星观测值的先验方差可以促进定位精度的提高^[10]。基线距离在几百米之内时,卫星截止角一般选为 10° ;超过 1 km 时,卫星截止高度角一般选为 15° 。不同高度角的卫星相位观测值可用下面经验公式确定观测值中误差:

$$\sigma_0 = \sigma_0 (1 + \cos^2 E) \quad (7)$$

σ_0 为卫星在天顶时的信号观测中误差,静态或低动态情况下一般为 2 mm ,常规动态情况下一般为 3 mm , E 为高度角, σ_0 为系数,一般取 $\sigma_0 = 1.5$ 。根据协方差传播律,可计算出新的双差观测权阵 P 。当同时处理两条以上的基线时,可以直接对单差观测值定权,单差观测值可以认为是独立观测值,单差观测值的精度与基线距离和卫星高度角有关,由于测站间的距离较近,卫星高度角只以监测点为准,我们给出如下经验公式:

$$\sigma_0 = \frac{2D}{25000} \sigma_0 (1 + \cos^2 E) \quad (8)$$

D 为基线距离,以千米为单位。

5 平滑方法

单历元定位方法是针对动态定位提出的一种实时定位方法,数值计算表明,即使对非差观测值考虑不同的权,每一历元的定位精度也很难突破 5 mm ,大多数情况下只能达到厘米级,使单历元定位的应用受到一定的限制。在很多情况下,监测点形变在一定时段内往往是静止不动的,或者其形变是线性变化的,此时可以建立监测点的坐标运动方程,如高精度大坝形变观测精度要求 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的观测精度,而且在较短观测时间内监测点可以认为是静止或线性运动的,此时可以采用平滑或滤波方法处理,则可

以达到毫米级定位精度。简单的处理方法是将单历元定位结果作为准观测值,建立如下的动态方程和观测方程:

$$Y_0(i) = Y_0(i - 1), v(i) = v(i - 1) \quad (9)$$

$$X_i = Y_0(i) + (t_i - t_0) v, \quad i \quad (10)$$

其中 Y_0 是参考时刻 t_0 的坐标, v 为位移速度且为待估参数, X_i 是单历元定位的坐标结果, i 为单历元定位坐标的协方差阵。当作为静态测量处理时 $v = 0$, 并忽略坐标分量的相关性,简化的平滑公式为

$$Y_0(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{i} \quad (11)$$

式中 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$, n 为静态观测时段的历元数, X_i 为各个历元计算出的坐标分量, i 为对应的中误差。平滑值的精度可以表示为

$$Y_0(n) = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

6 算例

6.1 形变模拟算例

在相距 240 m 的两点布设一基线 AB, 使用

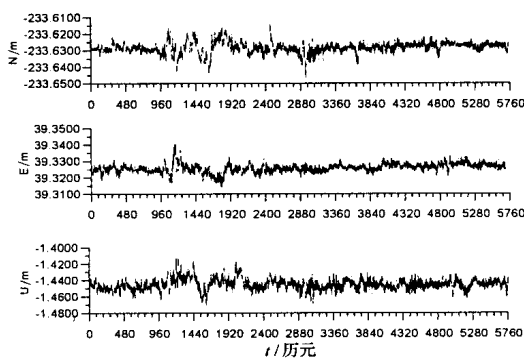


图 1(a) 形变前 24 小时单历元定位结果

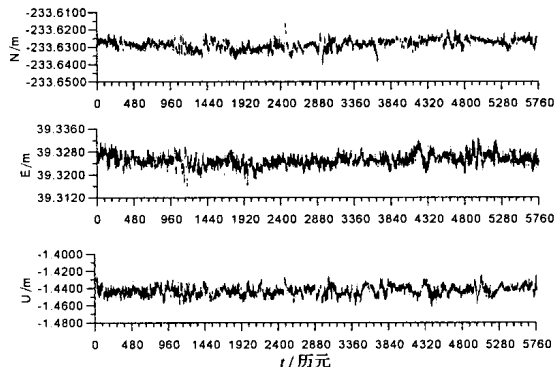


图 1(b) 形变后 24 小时单历元定位结果

Fig. 1 Coordinates time series of single epoch GPS positioning. (a) before deformation (b) after deformation

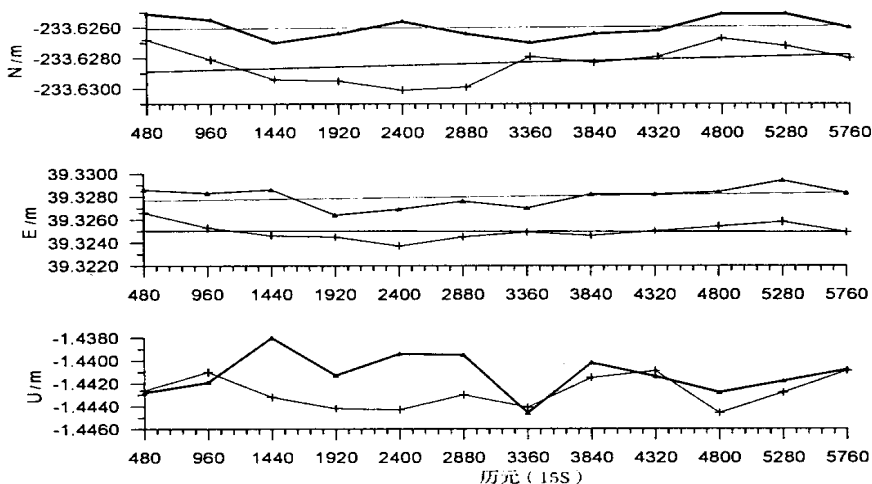


图 2 2 小时平滑结果。三角点代表位移发生前, 十字形点代表位移发生后

Fig. 2 Smoothing results using 2 hour data. (triangle: before deformation; cross: after deformation)

Javad GPS 接收机, 主站使用扼流圈天线 Regant-DDE, 形变监测站使用普通天线 Legant E, 采样间隔为 15 s, 静态观测, 连续观测两天共 48 小时, 每天的观测历元数为 5 760。以 A 作为基站, 并作为站坐标系的原点。为了验证阻尼 LAMBDA 方法监测形变的能力, 于第二天在监测点 B, 人为设置一个变形 (N: 3 mm, E: - 3 mm), 先对每一历元作伪距差分获得监测点的近似坐标和精度, 再利用阻尼 LAMBDA 方法计算出每一历元的坐标 (NEU), 计算结果见图 1(a)、1(b)。从图中可以看出, 单历元定位平面精度大约为 1~2 cm, 高程精度大约为 3 cm, 单纯从单历元定位结果分析毫米级的位移量几乎是不可能的。取两小时时段作静态平滑, 结果见图 2, 图中的三角点代表位移发生前的每 2 小时平滑值, 十字丝点代表位移发生后的平滑值, 此时可以检测位移量。为了检验平滑方案的效果, 与 Pinnacle 软件按标准静态定位的计算结果比较, 见表 1。二者水平方向之差都在 0.5 mm 以内, 高程之差一般都在 2 mm 左右, 边长之差最大为 0.4 mm。此结果表明单历元平滑结果与标准静态定位结果精度是相当的。

表 1 2 小时单历元定位平滑值与标准静态定位结果 (Pinnacle 软件计算) 的比较 (m)

Tab.1 The comparison between Smoothed results of single epoch GPS positioning and static computed results by Pinnacle software (m).

时段	N		E		U		L	
	平滑值	Pinnacle	平滑值	Pinnacle	平滑值	Pinnacle	平滑值	Pinnacle
1	-233.626 8	-233.626 6	39.326 6	39.326 2	-1.442 6	-1.443 9	236.918 0	236.917 8
2	-233.628 1	-233.627 7	39.325 3	39.325 5	-1.441 0	-1.442 6	236.919 1	236.918 7
3	-233.629 4	-233.629 1	39.324 6	39.324 1	-1.443 2	-1.446 9	236.920 2	236.919 9
4	-233.629 5	-233.629 6	39.324 5	39.324 6	-1.444 2	-1.446 2	236.920 3	236.920 5
5	-233.630 1	-233.629 7	39.323 7	39.324 0	-1.444 3	-1.446 2	236.920 8	236.920 5
6	-233.629 9	-233.630 1	39.324 5	39.324 3	-1.443 0	-1.446 2	236.920 7	236.920 9
7	-233.627 9	-233.628 1	39.324 9	39.325 3	-1.444 1	-1.446 0	236.918 8	236.919 1
8	-233.628 3	-233.628 2	39.324 6	39.325 0	-1.441 5	-1.442 0	236.919 2	236.919 1
9	-233.627 9	-233.627 7	39.325 0	39.325 6	-1.440 9	-1.443 5	236.918 8	236.918 7
10	-233.626 7	-233.626 7	39.325 4	39.325 0	-1.444 6	-1.445 2	236.917	236.917 7
11	-233.627 2	-233.626 8	39.325 8	39.326 0	-1.442 8	-1.444 2	236.918 3	236.917 9
12	-233.628 0	-233.628 1	39.324 9	39.324 7	-1.440 9	-1.443 4	236.918 9	236.919 0

6.2 清江隔河岩大坝形变监测实例

清江隔河岩大坝的 GPS 观测点位分布如图 3, 其中 GPS1 和 GPS2 为稳定点, GPS4、GPS5、GPS6 为大坝形变监测点, 观测仪器为 ASHTECH Z12 双频接收机。我们选择 GPS1 和 GPS2 为基准站, 二者的坐标为已知, 只考虑 GPS5 的变形情况, 该点至 GPS1 和 GPS2 的距离分别是 874 m 和 595 m, 采用的是 2003 年第 247 天全天的观测数据, 采样率为 20 s, 提供的原始数据大约每两小时为一个观测时段, 时段之间有不同的时间间隔, 共 12 时段。本算例的主要目的是为了比较采用两个基准站和单一基准站的单历元定位效果。由静态定位获得 GPS5 的坐标, 在此坐标的 x 、 y 、 z 分量中分别加 +2 cm、-3 cm、+4 cm 的偏差作为近似值, 近似坐标的精度均取为 5cm, 按 (5) 式给出阻尼矩阵。单历元定位时, 使用双频数据, 卫星高度截止角取为 15° , PDOP 大于 10 的历元不参加计算, 分别以 GPS1 为基站、GPS2 为基站、GPS1 和 GPS2 同时作为基站 3 种处理方式进行处理。采用地方站坐标系, 当然选用大坝轴线方向作为地方坐标系的坐标轴更为合理^[10], 考虑到水流方向大致为由南向北的方向, 也是主要发生形变的方向, 本文仍采用标准地方坐标系, 定义原点为 (-1 984 198.085 0, 5 132 155.177 7, 3 215 173.804 2)。图 4 是 GPS5 号点采用双基准站时的单历元定位结果。图 5 是 3 种不同基准站方式下每时段 (约 2 小时) 的平滑值, 从图中可以看出以 GPS2 为基站时, 坐标的重复性好于以 GPS1 基站的结果, 主要是由于基线 GPS2 ~ GPS5 的距离比 GPS1 ~ GPS5 的距离要短, 对流层残差较小, 此外 GPS1 的点位观测情况也较差, 多路径影响也比

GPS2 大。采用 GPS1 和 GPS2 同时作为基准站时, 相当于二者的加权平均。遗憾的是我们还不能肯定图中的坐标变化就是大坝的形变量, 假设在这一天中没有形变, 则表明 2 小时平滑后的平面定位精度约 3 mm, 但随观测时间的增加 (如文献 [9] 中采用的 6 小时), 分辨出大坝 1 ~ 2 mm 级的形变量是可行的。

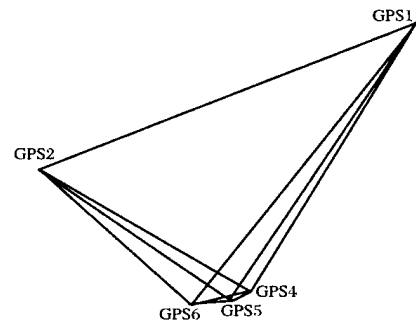


图 3 隔河岩大坝 GPS 监测点位图

Fig. 3 GPS sites on Geheyan Dam

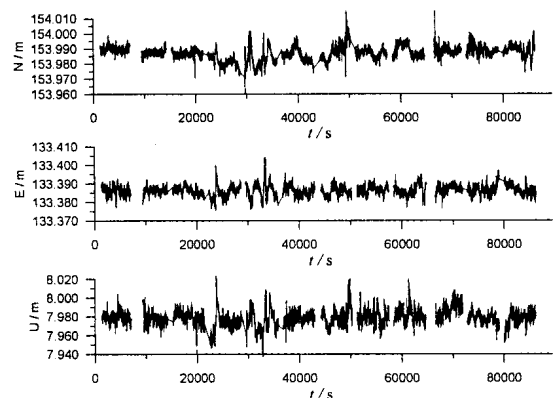


图 4 隔河岩大坝 GPS5 点单历元定位结果

Fig. 4 Coordinates time series of site GPS5

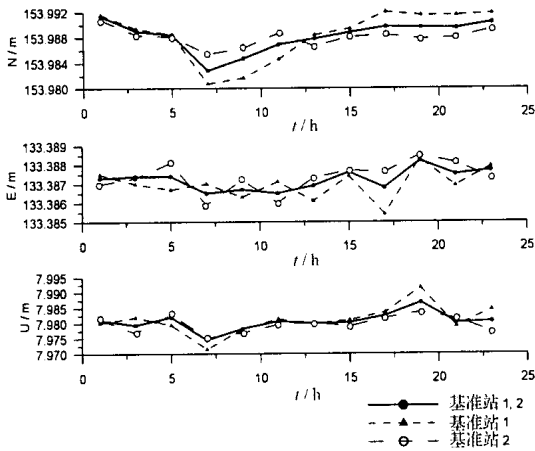


图 5 单基准站与双基准站的单历元定位平滑结果 (GPS)

Fig. 5 Smoothed results in 2 hours at site GPS5

7 结论

单历元定位的阻尼 LAMBDA 方法可以保证每一历元的定位精度达到厘米级,同时又可以采用平滑和滤波方法获得前一时段的静态观测结果,两种结果表面上都是以实时的结果输出的,因此统一了形变观测的动静态两种观测模式。一方面以高精度的坐标输出作为类似水库大坝这类高精度要求的形变监测手段,又有可能以每一历元时间间隔实时获得较大的形变信息,起到监测预报突发地震和滑坡的作用,而且当存在诸如滑坡这种连续形变时,单历元平滑方法也是常规静态方法所不能代替的。

致谢:清江隔河岩库坝中心贡建兵先生为本文提供了大坝 GPS 原始观测数据。

References

- 1 张小红,李征航,徐绍铨. 高精度 GPS 形变监测的新方法及模型研究[J]. 武汉大学学报·自然科学版,2001,26(5):451~454.
- 1 Zhan Xiaohong, Li Zhenghang, Xu Shaoquan. A new model for high accuracy deformation monitor with GPS[J]. Geomatics and Information Science of Whan University, 2001, 26(5):451 - 454. (in Chinese)
- 2 Liu Genyou, Zhu Yaozhong, Zhu Cailian. Damped LAMBDA algorithm for single epoch GPS positioning[A]. 2002 International Symposium on GPS/ GNSS[C]. Wuhan, China, Nov. 6 - 8, 2002.
- 3 刘根友,欧吉坤. GPS 单历元定向和测姿算法及其精度分析[J]. 武汉大学学报·自然科学版,2003,28(6):732~735.
- 3 Liu Genyou, Ou Jikun. Determining attitude with single epoch GPS algorithm and its precision analysis[J]. Geomatics and Information Science of Whan University, 2003, 28(6):732 - 735. (in Chinese)
- 4 陈永奇, James Lutes. 单历元 GPS 形变监测数据处理方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4):324~328.
- 4 Chen Yongqi, James Lutes. Development of the methology single epoch GPS deformation monitoring [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(4):324 - 328. (in Chinese)
- 5 熊永良, 黄丁发, 张献洲. 一种可靠的含有约束条件的 GPS 变形监测单历元求解方法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2001, 26(1):51~56.
- 5 Xiong Yongliang, Huang Dingfa, Zhang Xianzhu. A reliable GPS single epoch processing algorithm with known deformation interval constraints[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2001, 26(1):51 - 56. (in Chinese)
- 6 徐绍铨, 余学祥. 用两颗 GPS 卫星进行变形监测的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(1):77~80.
- 6 Xu Shaoquan and Yu Xuexiang. Research on deformation monitoring with two GPS satellites[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(1):77 - 80. (in Chinese)
- 7 Teunissen P J G. The least - squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation[J], Journal of Geodesy, 1995, (70):65 - 82.
- 8 刘根友. 单频 GPS 接收机动态定位的相位与伪距联合定位算法及其周跳检测[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(3):26~31.
- 8 Liu Genyou. Real-time positioning algorithm with single frequency GPS phase and pseudorange and detection of cycle slip[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2001, 21(3):26 - 31. (in Chinese)
- 9 李征航, 吴云孙, 李振洪, 李英冰. 隔河岩大坝外观形变数据的处理和分析[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6):482~484.
- 9 Li Zhenghang, Wu Yunsun, Li Zhenhong, Li Yingbing. Data processing and analysis of GPS automatic monitoring system of outside deformation for Geheyan dam [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(6)482 - 484. (in Chinese)
- 10 Han S. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning [J]. Journal of Geodesy, 1997, (71):351 - 361.