

文章编号: 0253-3782(2005)04-0402-07

GPS 单历元定位新算法用于滑坡监测^{*}

刘根友¹⁾ 朱耀仲¹⁾ 周蓉生²⁾

1) 中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所

2) 中国成都 610059 成都理工大学

摘要 在滑坡变形较大时, 常规 GPS 静态观测方式满足不了滑坡实时监测的需要。本文结合滑坡变形的特点, 利用 GPS 单历元定位新方法——单历元阻尼 LAMBDA 方法, 对滑坡实时形变进行了监测试验。该方法不需要考虑 GPS 载波相位测量中棘手的周跳问题, 每一历元即可搜索到正确的整周模糊度, 从而获得监测点厘米级精度的坐标。采用平滑方法后可以分辨出毫米级精度的坐标和滑动速度, 扩大了 GPS 形变监测的应用范围。本文简要介绍了新方法的原理, 并使用低价位的单频 GPS 接收机, 在江西省一个实测滑坡中取得了较好的应用效果。

关键词 形变监测 滑坡 GPS 单历元定位 模糊度解算

中图分类号: P315.72⁺⁵

文献标识码: A

引言

中国是一个滑坡、泥石流多发国家, 由于滑坡、泥石流的发生每年给人民的生命财产造成了巨大的损失。实时监测滑坡的变形特征, 对及时有效预报滑坡具有重要意义。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, 而且在滑坡变形剧烈期间对观测人员的安全也构成威胁。GPS 由于具有全天候、高精度、自动化程度高等特点, 已开始用于各类大坝和滑坡的形变监测。但是, 为了保证观测精度, 目前主要采用静态定位方法, 即一般需要几十分钟到几个小时才能获取一次形变信息(张小红等, 2001), 在变形或位移速度较快时期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, 主要应用于中短基线。其特点是仅利用一个历元的观测数据确定整周模糊度, 一旦整周模糊度固定即可获得该历元时刻待定点厘米级或亚厘米级精度的坐标。单历元定位成功的一个前提是要求具有较高精度的近似坐标, 对于单频 GPS 接收机, 一般要求分米级精度的近似坐标, 双频接收机可以放宽到 2 m(刘根友等, 2004; 刘根友, 欧吉坤, 2003), 而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。单历元定位传统的模糊度搜索是, 根据坐标近似值精度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(陈永奇, Lutes, 1998; 熊永良等, 2001)。当滑坡变形剧烈时, 例如几十厘米, 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。Teunissen(1995)针对快速

* 中国科学院动力大地测量学重点实验室开放基金(L04-07)、国家自然科学基金(40474010)和四川省科技厅项目(02GG066-048)资助。

2004-05-08 收到初稿, 2004-10-26 收到修改稿, 2004-12-07 决定采用。

静态定位, 提出一种非常有效的模糊度搜索方法——LAMBDA 方法。但是单历元载波相位观测的法方程是秩亏的, 不能获得模糊度的方差协方差矩阵, 单纯的 LAMBDA 方法无能为力。笔者基于监测点概略精度的条件下(坐标约束), 提出了单历元定位的阻尼 LAMBDA 方法。该方法解决了法方程的病态和秩亏问题, 其计算速度快, 应用范围广。在变形观测时, 模糊度搜索的正确率可达 100% (刘根友等, 2004)。本文首先简要介绍这种方法的原理, 并用低价位的单频 GPS 接收机在江西省内的一个实际滑坡上进行了试验, 验证了该方法的有效性。

1 常规 GPS 静态测量

一般型号的 GPS 接收机都具有伪距和载波相位两种基本观测量, 伪距观测值的精度一般为 1~3 m, 相位观测值的精度一般为 2~5 mm。高精度形变监测必须采用相位观测值定位, 但载波相位的初始整周数是未知的, 即整周模糊度。考虑到大气延迟误差的影响, 相位观测方程可以表示为

$$\lambda\varphi = \rho - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}} - \lambda N + c\delta t_r - c\delta t^s + \epsilon_\varphi \quad (1)$$

其中, $\rho = [(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2]^{1/2}$ 为测站到卫星的几何距离(理论值); (X^s, Y^s, Z^s) 为卫星坐标, 可以根据卫星广播星历计算, (x, y, z) 为待定点坐标; λ 为载波波长; N 为整周模糊度未知数; δt_r 为接收机钟差; δt^s 为卫星钟差; d_{ion} 为电离层延迟, 对伪距的影响为正, 相位的影响为负; d_{trop} 为对流层延迟; c 为光速; ϵ_φ 为观测噪声。

测站坐标 (x, y, z) 可以表示为近似值 (x_0, y_0, z_0) 与改正值 (dx, dy, dz) 之和, $x = x_0 + dx$, $y = y_0 + dy$, $z = z_0 + dz$ 。理论距离 ρ 可以展开为线性形式

$$\rho = \rho_0 - \frac{X^s - x_0}{\rho_0} dx - \frac{Y^s - y_0}{\rho_0} dy - \frac{Z^s - z_0}{\rho_0} dz \quad (2)$$

式中, ρ_0 为由近似坐标计算的理论距离。

在短基线定位时采用双差可以消除钟差和大气延迟误差, 某一历元 $n+1$ 颗观测卫星的双差误差方程可表示为(刘根友, 2001)

$$\begin{matrix} \mathbf{V} &= & \mathbf{A} & \mathbf{X} + \mathbf{B} & \mathbf{Y} - \mathbf{L} & \mathbf{P} \\ n \times 1 & & n \times 3 & 3 \times 1 & n \times n & n \times 1 & n \times n \end{matrix} \quad (3)$$

式中, \mathbf{X} 为坐标未知数(3 个), \mathbf{Y} 为模糊度未知数(n 个), \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为相应的系数阵, \mathbf{L} 为双差观测值减计算值; \mathbf{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(刘根友, 2001)

$$P_{ij} = \frac{(n+1-i)j}{(n+1)\sigma_0^2} \quad j \geq i \quad (4)$$

其中, σ_0^2 为单差观测方差。

连续观测 m 个历元, 有 $m \times n$ 个观测方程, 按最小二乘原理, 组成的法方程为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \end{pmatrix} \quad (5)$$

上式可以分解为

$$\mathbf{X} = \mathbf{N}_{aa}^{-1} (\mathbf{U}_a - \mathbf{N}_{ab} \mathbf{Y}) \quad (6a)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{N}_{bb}^{-1} (\mathbf{U}_b - \mathbf{N}_{ba} \mathbf{X}) \quad (6b)$$

式中, $\mathbf{N}_{aa} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$, $\mathbf{N}_{bb} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$, $\mathbf{U}_a = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}$, $\mathbf{U}_b = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}$, $\mathbf{N}_{ab} = \mathbf{N}_{ba}^\top = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$ 。

在静态观测时, 理论上只需要观测两个历元就可以解算法方程(5). 不考虑模糊度的整数性质, 按法方程(5)直接求逆获得的坐标和模糊度值, 称为浮动解. 当观测时间较短时, 由于法方程的病态特征, 浮动解很难获得精确的坐标解. 针对模糊度的整数特性, 一些学者提出了一些基于模糊度协方差矩阵分析的快速解算整周模糊度方法. 其中, LAMBDA 方法是最有效的方法之一, 使得过去需要一至几个小时观测才能实现的精度缩短到 10 分钟左右. 在滑坡形变监测时, 为了确保 1 cm 左右的定位精度, 一般比较保守的做法都采用 1 小时左右的观测时段. 常规静态测量为室内事后处理, 不能实时掌握滑坡的变形情况. 另一方面, 静态定位的前提是要求观测方程(3)中的坐标未知数在整个观测时段内保持不变, 即使存在位移, 也作为静止看待, 势必增加计算误差. 当位移较大时(如超过 0.5 m), 常规静态方法根本无法获得正确解.

2 GPS 单历元定位方法

鉴于常规 GPS 静态定位在滑坡位移较大时所存在的缺点, 可采用 RTK(实时动态定位)接收机观测. 但是, RTK 接收机在每次观测时都需要初始化时间固定模糊度, 在观测过程中还需要诊断和修复周跳, 这对动态定位的单频接收机而言, 几乎是不可能的. 而且, RTK 接收机一般为双频接收机, 其价格比较昂贵. 本文只考虑低价位的单频接收机, 采用单历元定位方法. 该方法具有无需初始化步骤, 不必考虑棘手的周跳问题, 以及实时等优点.

2.1 单历元定位的可行性分析

单历元的观测方程同式(3). 由于未知数的个数大于观测方程个数, 在数学上有无穷多组解. 但是, 模糊度的整数特性表明, 不同的模糊度组合计算出的坐标解是一些离散点. 在坐标约束的条件下, 这些离散点的个数是有限的, 每个候选点对应的 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 却不同, 如果相位观测精度足够高, 取 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 最小的点作为最优解, 并用比值 R 衡量解得可靠性

$$R = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}_{\text{次小}}}{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}_{\text{最小}}} \quad (7)$$

R 值越大, 说明解的可靠性越高, 一般要求 $R > 2$. 这种检验称为 ratio 检验.

为了说明坐标约束在单历元算法中的必要性, 以二维后方定位为例, 此时待定点落在以波长为步长的同心圆的交点上(图1). 在载波相位观测时, 测站到卫星的相位观测值整数部分是未知的, 但其小数部分可精确测得. 如果没有其它系统误差, 其精度为 2~3 mm.

图 1 中, A, B, C 代表观测卫星, 当只对 A, B 进行观测时, 可以根据相位观测值的小数部分作两组同心圆, 每个圆对应不同的模糊度, 每组同心圆之间的距离等于载波波长. 测站的候选点为 1~9 号点(没有坐标约束时, 有无穷多个点, 图中仅列出 9 个), 而且, 每个点都是最优点(残差平方和为 0). 如果坐标约束足够小(小于 1 周), 如图中的虚线框, 此时可以唯一确定点位 5. 当同时观测卫星 A, B, C 时, 设 5

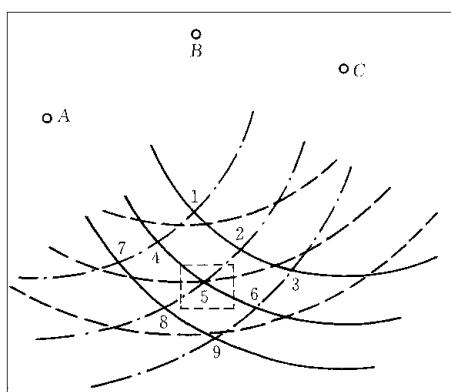


图 1 二维情况下的坐标候选点

号点为测站的真实位置, 可以推算出该点对卫星 C 不足一周的理论观测值。根据这一观测值作第三组同心圆, 三圆近似交于一点的点位有 5, 9 号点, 其它点都相差较远。表明这些点的残差平方和较大。由于存在观测误差, 真位置 5 和 9 号点的残差平方和可能非常接近, 有时会出现其它点的残差平方和比真位置的残差平方和还小的情况, 从而得出错误的结果。可以设想, 如果再增加一颗观测卫星, 有可能排除 9 号点, 增加观测卫星数有助于提高 ratio 检验的可靠性。实际的 GPS 观测是三维的, 其坐标解落在以波长为步长的同心球面的交点上。因此, 当坐标约束一定时, 根据 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 最小有可能获得唯一的精确坐标。

常规单历元算法的具体步骤如下:

1) 根据初始坐标计算近似模糊度。此时假设坐标增量改正数 \mathbf{X} 为 0, 由(6b)式得

$$\mathbf{Y} = \mathbf{N}_{bb}^{-1} \mathbf{U}_b \quad (8)$$

2) 根据初始坐标精度确定模糊度搜索空间。设初始坐标的精度为 σ , 令 $m = \sigma/\lambda$ 。对非差或单差而言, 每颗卫星的搜索范围为 $(-m, +m)$ 。若观测卫星数为 n 颗, 则共有 $(2m+1)^{n-1}$ 个组合。如 $m = 3$ ($\sigma = 0.5$ m), $n = 7$ 时, 共有 117 649 种组合。对于双差, 每一卫星的搜索范围为 $(-2m, +2m)$ 。当 $m = 3$, $n = 7$ 时, 共有 4 826 809 个组合。

3) 根据不同模糊度组合, 由式(6a)计算待定点的坐标, 代入式(3)计算残差 \mathbf{V} , 取 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 最小的一组作为最优解, 并进行 ratio 检验。

2.2 阻尼 LAMBDA 算法

上节分析表明, 即使近似坐标精度达到 0.5 m, 采用常规单历元定位的计算量仍然非常大, 将影响单历元的实时计算。陈永奇和 Lutes(1998)以及熊永良等(2001)只采用 PDOP 最小的 4 颗或 5 颗卫星进行搜索, 很大程度上是为了减少模糊度的组合, 这势必降低定位精度和解的置信度。

LAMBDA 算法是最好的模糊度搜索方法之一, 但它要求模糊度的协方差阵, 需要通过对法方程求逆获得。而单历元的法方程是秩亏的, 不存在凯莱逆。在最优化方法中, 为了解决法方程的病态问题, 通过适当加大矩阵主对角元素可以改善法方程的条件数, 即阻尼最小二乘法。将这一概念用于 GPS 的单历元解算, 此时的阻尼因子以坐标先验的权阵 \mathbf{P}_x 代替, 法方程(5)转化为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{P}_x & \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \end{pmatrix} \quad (9)$$

设坐标初始值的精度为 $(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33})$, 相位测量单位权方差 σ_0^2 , 可获得 \mathbf{P}_x

$$P_{ij} = \begin{cases} \sigma_0^2 / \sigma_{ii}^2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

在法方程(9)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, 待求点的近似坐标一般可以预测到 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取为 0.5 m。在高动态定位时, 近似坐标可以利用伪距差分、卡尔曼滤波方法获得。采用坐标约束后, 可以计算模糊度的协方差矩阵

$$\mathbf{Q}_Y = \mathbf{N}_{bb}^{-1} + \mathbf{N}_{bb}^{-1} \mathbf{N}_{ba} (\mathbf{N}_{aa} + \mathbf{P}_x - \mathbf{N}_{ab} \mathbf{N}_{bb}^{-1} \mathbf{N}_{ba})^{-1} \mathbf{N}_{ab} \mathbf{N}_{bb}^{-1} \quad (11)$$

模糊度协方差矩阵的条件数代表了模糊度未知数之间的相关性, 其条件数越小, 表明相关性越小, 越有利于模糊度搜索。尽管坐标约束不能改变浮动解的值, 但却可以改变模

糊度协方差矩阵的条件数。表 1 给出了根据某单一历元模糊度协方差矩阵的条件数随坐标约束的变化情况。可以看出，坐标约束越强，条件数越小。

表 1 某单一历元模糊度协方差矩阵的条件数(cond)随坐标约束(σ_x)的变化情况

σ_x/m	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0
cond.	7.04	8.01	12.55	1.96×10^2	7.72×10^2	1.92×10^2	7.68×10^4	7.68×10^4	3.07×10^5
σ_x/m	3.0	5.0	10	20	50	100	1000	10000	100000
cond.	6.92×10^5	1.92×10^6	7.68×10^6	3.07×10^7	1.92×10^8	7.68×10^8	7.68×10^{10}	7.60×10^{12}	6.23×10^{14}

单历元定位时，由于观测值很少，充分利用观测值的权有助于模糊度的搜索和提高坐标解的精度。由于不同高度角的卫星所受的大气延迟误差不同，故我们采用与卫星高度角相关的随机误差模型(Han, 1997)

$$\sigma = s[a_0 + a_1 \cdot \exp(-E/E_0)] \quad (12)$$

式中， σ 为 L_1 观测的标准差； a_0 ， a_1 ， E_0 为常数，与接收机类型有关； s 为尺度因子。

即使考虑了坐标约束，由于单历元定位的观测方程个数与模糊度未知数的个数相等，而且还包含了坐标未知数，故按常规思路不能计算坐标估值的精度。但是，由于模糊度的整数特性，模糊度解算要么正确，要么错误，一旦根据某种判别方法确定模糊度后，就可以不再考虑模糊度的精度问题，此时等效于伪距测量。当观测 5 颗以上卫星时就有多余观测，可计算出单位权方差，坐标未知数的协因数阵直接采用 $(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}$ 。

2.3 单历元定位的平滑方法

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。在模糊度解算正确的条件下，定位精度只依赖于当前历元的相位观测精度，一般只能达到厘米级精度，其应用范围受到一定的限制。一般情况下，监测点在一定时段内往往是静止不动或者其形变呈线性变化，此时可以采用平滑或滤波处理来提高定位精度，以便检测出毫米级的微小位移。简捷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：

$$\mathbf{Y}_0(i) = \mathbf{Y}_0(i-1) \quad v(i) = v(i-1) \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{Y}_0(i) + (t_i - t_0)v \quad \boldsymbol{\Sigma}_i \quad (14)$$

其中， \mathbf{Y}_0 是参考时刻 t_0 的坐标， v 为位移速度，二者均为待估参数。 \mathbf{X}_i 是单历元定位的坐标结果， $\boldsymbol{\Sigma}_i$ 为单历元定位坐标的协方差阵。当忽略运动模型的误差时，平滑值的精度可以用 σ_s / \sqrt{n} 估算，其中 σ_s 为单历元定位的精度， n 为历元数。若单历元定位精度为 2 cm，则 100 历元后就可以达到 2 mm 的精度。

3 实验

该滑坡位于江西省 320 国道附近，经纬度为(27°41'N, 113°48'E)，滑坡范围大约 2 万平方米。在滑坡体外选择一稳定点作为基站，监测点位于滑坡主体上，基线长为 535 m。使用南方测绘仪器公司生产的两台单频 GPS 接收机进行观测。观测时间为 2003 年 8 月 7~10 日和 16~21 日。试验本身采用静态定位方式观测，采样率为 15 s，每小时为一个时段，只限于白天时间。采用笔者研制的 IGGGPS 软件进行处理，坐标系采用基站的地方水平坐标系，卫星的截止高度角取为 15°，按经典静态定位计算。图 2 是整个观测期间的位移情况。观测结果表明，8 月 7~10 日滑坡基本处于稳定状态，而 16~21 日则滑坡存在匀速的滑动现象。为了验证单历元定位的有效性，我们只采用 17~18 日两天的观测数据，从北京

时间 17 日 11 点~18 日 19 点约 33 小时。首先取第一个时段作经典静态定位, 获得监测点的初始坐标, 再利用本文提到的新方法进行单历元计算, 监测点的坐标时间序列如图 3 所示。在本算例中单历元定位本身的精度在水平方向大约为 2~3 cm, 高程方向为 4~5 cm, 在较长时段内能够反映系统的位移情况。在大约 33 小时时段内, 滑坡存在明显的线性位移, 位移量达到北向 25 cm, 西向 9 cm, 垂直向下降 8 cm; 位移速度分别为北向 7.8 mm/h, 西向 2.9 mm/h, 垂直下降 2.4 mm/h。尽管这一位移还允许采用 GPS 静态观测手段, 单历元定位的优越性还没有充分体现出来, 但至少可以证明单历元定位的阻尼 LAMBDA 方法是可行的。表 2 列出了静态定位与单历元平滑的数值结果, 二者差异小于 1 cm, 绝大多数情况小于 5 mm, 表明平滑结果接近于静态定位的精度。

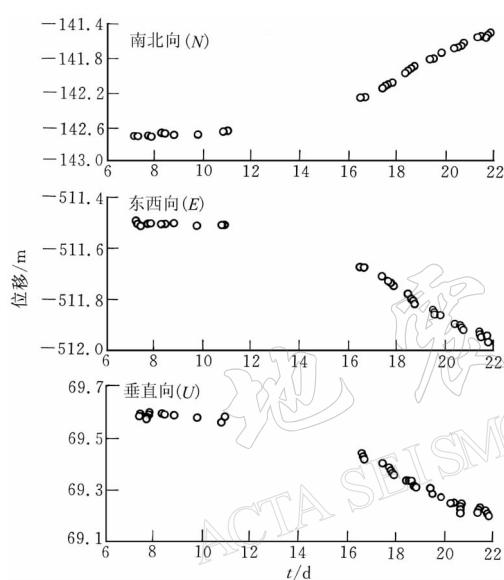


图 2 2003 年 8 月 7~10 日、16~21 日
静态测量位移

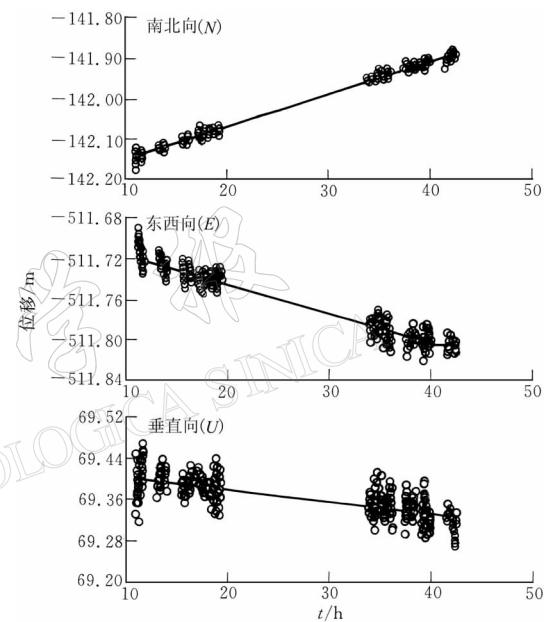


图 3 2003 年 8 月 17~18 日单历元定位结果

表 2 8 月 17, 18 日静态测量与单历元平滑结果比较(参考时刻相对于 GMT2003 年 8 月 17 日 0 时)

时段	历元数	参考时刻 /h	N/m		E/m		U/m	
			静态	单历元平滑	静态	单历元平滑	静态	单历元平滑
1	168	11.42	-142.134	-142.140	-511.715	-511.714	69.410	69.400
2	240	13.68	-142.118	-142.119	-511.727	-511.727	69.395	69.399
3	239	16.01	-142.098	-142.098	-511.735	-511.734	69.382	69.384
4	240	17.51	-142.080	-142.084	-511.743	-511.740	69.387	69.388
5	241	18.84	-142.077	-142.077	-511.743	-511.742	69.376	69.380
6	240	34.34	-141.953	-141.951	-511.787	-511.786	69.344	69.350
7	241	35.76	-141.943	-141.944	-511.792	-511.793	69.345	69.346
8	241	37.93	-141.928	-141.928	-511.799	-511.799	69.346	69.348
9	238	39.51	-141.915	-141.916	-511.801	-511.801	69.323	69.328
10	240	42.01	-141.900	-141.898	-511.806	-511.805	69.321	69.316

4 结论

滑坡形变监测可以采用静态定位和动态定位两种方式，使用单历元定位的阻尼 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间段的静态观测结果。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。单历元定位的最大优点是实时性，不考虑周跳，能够及时发现大的位移情况，而且在形变较大时是常规静态测量所无法取代的。本文只是在数值上验证了该方法在单频接收机监测滑坡的效果，在今后的实际作业时，还需要对接收机增加数据链，才能真正做到实时监测。

参加 GPS 数据采集的人员还有马英杰、王仁波、赵申杰、王克军和赵建武。

参 考 文 献

- 陈永奇, Lutes J. 1998. 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, **23**(4): 324~328
 刘根友. 2001. 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, **21**(3): 26~31
 刘根友, 欧吉坤. 2003. GPS 单历元定向和测姿算法及其精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), **28**(6): 732~735
 刘根友, 朱耀仲, 韩保民. 2004. GPS 单历元定位的阻尼 LAMBDA 算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), **29**(3): 195
 ~197
 熊永良, 黄丁发, 张献洲. 2001. 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, **26**(1): 51 ~ 56
 张小红, 李征航, 徐绍铨. 2001. 高精度 GPS 形变监测的新方法及模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), **26**(5):
 451~454
 Han S. 1997. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning[J]. *J Geodesy*, **71**: 351~361
 Teunissen P J G. 1995. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation[J]. *J Geodesy*, **70**: 65~82

A NEW APPROACH OF SINGLE EPOCH GPS POSITIONING FOR LANDSLIDE MONITORING

Liu Genyou¹⁾ Zhu Yaozhong¹⁾ Zhou Rongsheng²⁾

1) Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2) Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: When the deformation of landslide becomes larger, the conventional static GPS surveying cannot satisfy the real-time requirement in landslide monitoring. In this paper we present a new method for single epoch GPS positioning combining with the accuracy of approximate coordinates of monitored station in landslide monitoring. This algorithm does not consider troublesome cycle-slip problem of carrier phase, and integer ambiguities can be solved at a single epoch, so the centimeter level accurate coordinates can be calculated instantaneously. By means of filtering or smoothing, this method can be extended to detect millimeter level deformation and velocity. In order to test the new method, low-cost single frequency receivers have been used in a real landslide, which happened in Jiangxi Province, China.

Key words: deformation monitoring; landslide; single epoch GPS positioning; ambiguity resolution