

一种可靠的含约束条件的 GPS 变形监测 单历元求解算法

熊永良¹ 黄 磊¹ 张献洲¹

(1 西南交通大学测量工程系, 成都市二环路北一段 111 号, 610031)

摘要: 在分析现有 GPS 单历元算法存在问题的基础上, 针对建筑物变形监测的特点, 提出了一种可靠的含变形区间约束条件的 GPS 变形监测单历元算法。该法适用于主要变形特征可以预知的建筑物动态变形监测, 成功率高、可靠性好、可分离度强等, 特别适用于施工干扰大、卫星信号易中断且卫星数少的建筑工地的建筑物变形监测。实际算例证明了该法的有效性和实用性。

关键词: GPS; 变形监测; 单历元算法; 约束条件

中图法分类号: P228.41

随着各种大型建筑物的兴建, 建筑物变形监测越来越重要。在对建筑物进行快速、实时监测方面, 传统的变形测量方法已显得越来越力不从心。由于 GPS 具有高效、快速、全天候、全时相、全自动等特点, 已广泛应用于各种测量。近年来, GPS 用于变形监测得到迅速发展, 如用于地壳形变监测^[1]、大坝变形监测^[2]、高层建筑物变形监测^[3, 4]等。GPS 用于变形监测的作业方法主要有经典静态测量方法和动态测量方法。经典静态测量方法用于缓慢变形场合, 如地壳形变等; 动态测量方法用于快速变形的场合, 如高层建筑的风振监测^[5], 通常用 OTF 方法解算。以上方法的共同缺点是当卫星被遮挡或卫星信号失锁时, 初始整周模糊度需要重新求定。在建筑工地, 如高层建筑、电视塔等工地, 卫星信号经常被遮挡和中断, 以上几种方法均难以应用。文献[3, 5, 6] 研究过用单历元法求解建筑物变形的方法。该法的优点是当卫星信号失锁时, 只影响失锁历元的位移求定, 当卫星信号被重新捕获, 从捕获历元起的所有历元的位置均可求解, 无需模糊度的重新初始化。该方法充分利用了建筑物的初始位置可以预先确定这一特点。

单历元算法的成功率和有效性与卫星的数量、分布及观测条件密切相关。通常的单历元算

法的成功率不高, 尤其是在卫星数少、信号容易中断和遮挡以及受多路径影响严重的建筑工地更是如此。成功率还与基线长度有关, 基线越长, 成功率越低; 基线越短, 成功率越高。本文在分析通常的 GPS 单历元算法存在问题的基础上, 提出了一种可靠的单历元求解方法, 适用于主要变形特征可以预知的建筑物动态变形监测。该法充分利用了建筑物主要变形特征可以预先知道这一特征(如高层建筑和电视塔等在水平位移时, 高差变形很小; 如桥梁等在垂直位移时, 水平位置变形很小)。该方法成功率高, 可靠性好, 可分离度强, 实际数据分析证明了该法的有效性和可靠性。

1 GPS 变形监测单历元算法的一般步骤

1.1 候选模糊度空间的构成

测站初始坐标的确定可用三差模型、相位平滑伪距技术等实现。由初始坐标可计算近似初始模糊度 N_0 。选择一高度角最大的卫星作为基星, 选择 4 颗 GDOP 最小卫星的 L_1 观测值组成 3 个双差观测值。设近似模糊度 N_0 的变化范围为 ΔN , ΔN 的取值依初始坐标的精确度及预期变形范围而定(通常取 3~5), 则有如下双差观测方程:

$$l = AX + e \quad (1)$$

式中, $l = Y - B (N_0 + \delta N)$, 其中 Y 为双差观测向量; X 为坐标向量; e 为观测噪声。依据 3 个初始双差模糊度的变化范围, 可求出相应的坐标作为候选坐标值。由候选坐标可反算出 L_1 其他的模糊度及 L_2 所有的模糊度。设由候选坐标构成的集合为 Ω_{X_1} , 与 Ω_{X_1} 相应的模糊度向量构成的集合为 Ω_{N_1} 。

1.2 模糊度函数值 AFV 的计算

根据候选坐标, 利用 L_1 和 L_2 的所有观测值进行模糊度真值的搜索。在搜索时, 使用了模糊度函数法及 F 检验。

模糊度函数值 AFV (ambiguity function value) 定义为:

$$\begin{aligned} \text{AFV}(x, y, z) = & \\ & \sum_{r=1}^{n_r} \sum_{e=1}^{n_e} \sum_{f=1}^{n_f} \left[\sum_{s=1}^{n_s} (\cos(\text{obs} - \text{com}) + \right. \\ & \left. \frac{i \cdot \sin(\text{obs} - \text{com})}{n_f \cdot n_s} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, obs 为双差或单差观测值; com 为双差(或单差)计算值; n_s 为卫星个数; n_f 为频道数; n_e 为历元数; n_r 为参考站数。

1.3 候选坐标位置的模糊度函数值的计算

根据候选坐标, 可计算出其他所有双差模糊度值, 并将所有 L_1 和 L_2 的双差观测值及其计算值代入式(2), 计算该位置的 AFV。设 Ω_{X_1} 中所有满足 $\text{AFV} > \rho_0$ 的坐标构成的集合为 Ω_{X_2} , 设与 Ω_{X_2} 相应的模糊度集合记为 Ω_{N_2} 。只有 Ω_{N_2} 中的模糊度向量才参与模糊度真值的筛选和 F 检验。

1.4 模糊度真值的筛选与 F 检验

对于 $\text{AFV} > \rho_0$ 的候选坐标, 利用所有 L_1 和 L_2 的双差观测值组成误差方程, 并按最小二乘法求出方差因子, 选出最小方差和次小方差, 然后作 F 检验。

$$\text{Ratio} = \frac{\sigma_{\text{sec}}^2}{\sigma_{\text{min}}^2} \quad (3)$$

原假设 $H_0: \sigma_{\text{min}} = \sigma_{\text{sec}}$; 备选假设 $H_a: \sigma_{\text{min}} \neq \sigma_{\text{sec}}$ 。

当 $\text{Ratio} > F_0$ 时, 接受备选假设, 即认为最优位置与次优位置能够很好区分, 即求解成功, 否则求解失败。

2 通常的 GPS 单历元算法的缺点

通常 GPS 单历元算法存在的问题是成功率

低、可靠性差及可区分度(指最优解与次优解的可区分度)弱。如文献[6]中有一条 2.2km 的基线, 观测 264 个历元, 只正确求出 225 个历元, 成功率只有 85%。下面以一条长为 3959.130m 的基线为例, 通过数值计算, 分析上述算法成功率低的原因。该基线用 Leica GPS200 型接收机静态观测 130 个历元, 采样间隔为 15s, 观测期间能同时跟踪到的卫星只有 6 颗。以卫星 1 为基星, 用静态软件解算出 L_1 的 5 个双差模糊度真值为: -2、-34、42、22、-24。按前述算法, 用卫星 1、2、3、4 的 3 个双差模糊度真值(-2, -34, 42)代入式(2), 求出的坐标设为 X_4 , X_4 与其真实坐标之差列于表 1。表 1 中与 X_4 相应的模糊度函数值为 AFV。候选集 Ω_{X_1} 中最大的模糊度函数值为 maxAFV 。

表 1 中同时列出了用 M_1, M_2, M_3, M_4 四种算法求解的几项质量指标(见 §4)。用 1~5 颗卫星的双差模糊度真值代入式(2), 求出的坐标设为 X_5, X_5 与其真实坐标之差列于表 2。AFV 与 maxAFV 的含义同表 1。用传统单历元法求解时, 从 1~15 历元有 5 个历元不成功, 其原因在于:

1) 候选坐标精度低, 使得集合 Ω_{N_1} 中无模糊度向量真值。如第 10、11 历元, 由前 3 个双差模糊度真值代入式(2)中求得的坐标 X_4 与真值之差的总量分别为 16.1cm 和 15.7cm, 而由 X_4 反算出的模糊度为 -2、-34、42、22、-24、-23。因此 Ω_{N_1} 中无模糊度真值, 在后续的筛选过程中, 不管用什么方法, 都找不到正确的模糊度值。

2) Ω_{N_1} 中虽有模糊度向量真值, 但其对应的候选坐标精度低, 使得模糊度函数值的最大值与模糊度真值不对应以及所有候选坐标的 AFV 普遍偏小。在模糊度真值搜索时, 为了减小弃真概率, 须减小 AFV 的阈值 ρ_0 , 因而 Ω_{N_2} 中的候选模糊度向量增多。这一方面使得 F 检验的计算负荷加大; 另一方面, 由于候选模糊度向量个数的增加, 对模糊度向量真值的筛选形成一种“干扰”, 使得最小方差与次小方差的可区分度降低。如第 6 历元中的真值对应的 MAF 为 0.67, 而 Ω_{N_1} 中最大 MAF 为 0.94, 其对应的模糊度为 3、-34、42、0、-28, 显然与真值相去甚远。

3) 观测噪声较大, Ω_{N_2} 中虽有模糊度真值, 但用单位权中误差 m_0 最小的筛选准则无法将真值挑选出来。如第 6、9、15 历元, 方差最小对应的模糊度值并非真值。

表 1 4 颗卫星求候选坐标结果($\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.20m$)Tab. 1 Results from Different Algorithms by 4 Satellites ($\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.20m$)

历元	候选值 X_4 —真值/cm				AFV	最大 AFV	m_0	最小 m_0	Ω_{N_1} 有无真值	M_1			M_2		
	x	y	h	ds						成功否	R	Ka	成功否	R	Ka
6	-0.5	+1.0	+7.4	10.7	0.67	0.94	0.071	0.058	有	N	1.5	95	Y	1.5	6
9	-0.1	-0.4	+9.4	9.4	0.59	0.91	0.082	0.063	有	N	1.2	115	N	1.3	6
10	+1.0	+9.3	+13.1	16.1	0.57	0.90	0.084	0.076	无	N	1.1	117	N	1.2	6
11	-0.7	-9.0	+12.9	15.7	0.58	0.86	0.084	0.077	无	N	1.2	102	N	1.2	5
15	-0.1	-0.9	+5.9	6.0	0.73	0.77	0.074	0.074	有	N	1.1	110	N	1.2	4

表 2 5 颗卫星求候选坐标结果($\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.05m$)Tab. 2 Results from Different Algorithms by 5 Satellites ($\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.05m$)

历元	候选值 X_5 —真值/cm				AFV	最大 AFV	m_0	最小 m_0	Ω_{N_1} 有无真值	M_1			M_2		
	x	y	h	ds						成功否	R	Ka	成功否	R	Ka
6	-0.5	+1.0	-1.9	2.2	0.87	0.90	0.0710	1.01	有	Y	1.1	120	Y	6.4	8
9	-1.1	+0.4	-3.3	3.5	0.86	0.88	0.0820	1.19	有	N	1.2	124	Y	4.2	7
10	-0.2	+0.0	-2.5	2.5	0.84	0.90	0.0980	1.09	有	N	1.1	138	Y	3.6	6
11	-1.0	+0.4	-2.4	2.6	0.85	0.88	0.0880	1.06	有	N	1.1	129	Y	4.4	5
15	-0.1	+0.9	-1.5	1.8	0.87	0.89	0.0740	1.01	有	N	1.1	145	Y	5.5	10

4) 由于只用到一个历元的观测值, F 分布的自由度很小, 因此 F 检验的阈值 F_0 较大, 接受原假设 ($\sigma_{\min}=\sigma_{\sec}$) 的可能性很高, 这也是该法成功率低的原因之一。

3 一种可靠的带约束条件的 GPS 变形监测单历元算法

如前所述, 候选坐标精度低是求解失败的主要原因之一, 而候选坐标精度低的原因是卫星少及卫星几何图形不好。为了提高候选坐标的精度, 在 PDOP 不好的情况下应采用 5 颗卫星求解候选坐标。上例中用 5 颗卫星求得的候选坐标与真值差列于表 2。由表 2 可见, 候选坐标的精度大大提高, 原来的第 10、11 历元的 Ω_{N_1} 中的模糊度真值从无到有, 克服了用 4 颗卫星求候选坐标的缺陷。

其次, Ω_{N_2} 中模糊度向量个数的增加也是传统算法成功率低的原因之一。为了减少 Ω_{N_2} 中候选模糊度向量的个数, 当建筑物的主要变形特征为水平位移时(如高层建筑、电视塔等的风振变形、日照变形等), 在模糊度真值挑选过程中, 附加如下高差约束条件:

$$dh_i - dh_0 \leq \tau_0 \quad (4)$$

式中, $dh_i = H_{r_i} - H_b$; $dh_0 = H_{r_0} - H_b$, H_{r_i} 为由候选坐标求得的测点高程, H_{r_0} 为测点已知高程(可通过常规方法获得或多历元静态观测获得); H_b

为基准站已知高程。设 Ω_{X_2} 中所有满足式(4)的候选坐标所构成的集合为 Ω_{X_3} , 即

$$\Omega_{X_3} = \{X \mid Y = AX + B(N_0 + \delta N) + e, \\ \delta N \in [-\Delta N, +\Delta N], AFV \geq \rho_0, \\ dh_i - dh_0 \leq \tau_0\} \quad (5)$$

阈值 τ_0 的确定视 dh_0 、 dh_i 的精确度而定。 dh_0 及 dh_i 精确度高, τ_0 可取小些; 反之, τ_0 应取大些。考虑到用 4 颗卫星求候选坐标时, 候选坐标的精度一般高 20cm, 而用 5 颗卫星求候选坐标时, 候选坐标的精度一般高 5cm。故本文在用 4 颗卫星求候选坐标时, 取 $\tau_0=0.20m$; 用 5 颗卫星求候选坐标时, 取 $\tau_0=0.05m$ 。设与 Ω_{X_3} 对应的候选模糊度向量集合为 Ω_{N_3} 。对于以水平方向变形为主要特征的建筑物, 附加高差约束条件的理由为: 假定有一高 200m 的建筑, 其主要变形为水平方向的摆动, 假定其水平摆动范围为 $[-1m, +1m]$, 则很容易算出其高差变化范围为 $[-2mm, +2mm]$ 。这说明高耸建筑物在水平摆动过程中, 其高差变化是很小的。

同理, 对以垂直位移为主要变形特征的建筑物进行变形监测(如桥梁等的静载和动载挠度监测等)时, 增加如下水平位置约束条件:

$$ds_i \leq d_0 \quad (6)$$

式中, $ds_i = s_i - s_0$, s_0 为已知基线长, s_i 为由候选坐标求得的基线长; d_0 为给定的阈值, 视候选坐标的精度及可能的水平变形而定。 Ω_{X_2} 中所有满

足式(6)的集合设为 Ω_{N_3} , 相应的模糊度向量集为 Ω_{N_3} 。

附加高差约束条件后, Ω_{N_2} 中的坐标格网点限制在一个扁平的四面体内; 而附加水平位置约束条件后, Ω_{N_2} 中坐标格网点限制在一个细长的四面体内。因此, Ω_{N_3} 中的候选模糊度向量个数大大减少, 通常少于 10 个。由于只有 Ω_{N_3} 中的备选位置才参与 F 检验, 因此, 增加约束条件后, 不

仅提高了计算效率, 而且由于排除了大量可能会给 F 检验引起干扰的坐标点, 因而提高了方差比 R , F 检验的通过率大大提高, 模糊度正确求解的成功率也大大提高。该算法流程图见图 1。

4 实例分析

为了检验本文所提出算法的正确性和有效性, 比较了以下 4 种算法:

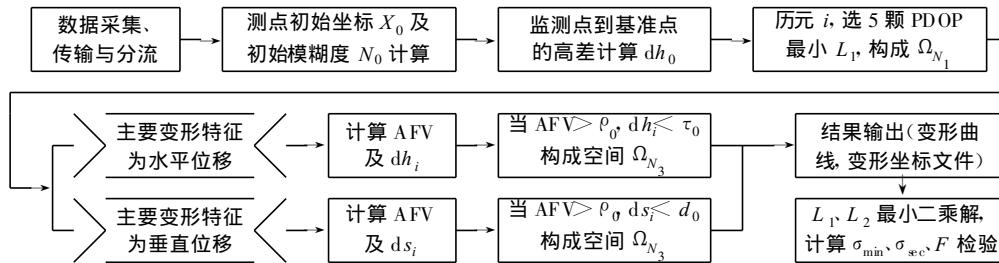


图 1 带约束条件的单历元 GPS 数据处理算法流程图

Fig. 1 Flow Chart of the Proposed Single Epoch Processing Algorithm

1) M_1 法: 以 PDOP 最小的 4 颗卫星求候选坐标, 仅含 $AFV < \rho_0$ 条件, 无约束;

2) M_2 法: 以 4 颗卫星求候选坐标, 含 $AFV < \rho_0$ 条件及约束条件 $dh_i - dh_0 \leq \tau_0$ ($ds_i - ds_0 \leq d_0$);

3) M_3 法: 以 5 颗卫星求候选坐标, 仅含 $AFV < \rho_0$ 条件, 无约束;

4) M_4 法: 以 5 颗卫星求候选坐标, 含 $AFV < \rho_0$ 条件及约束条件 $dh_i - dh_0 \leq \tau_0$ ($ds_i - ds_0 \leq d_0$)。

在以上 4 种算法中, 均取 $\Delta N = 4$ 。

试验 1: 静态观测, 动态解算。

该试验在一条长 3 950.130m 的基线 BJL-C250 上进行, 采样间隔 15s, 截止高度角 15° , 卫星数 6 颗, 共 130 个历元。以 BJL 为基准站, 用静态基线软件解算出基线的精确长度为 3 950.130m, L_1 模糊度为 $-2, -34, 42, 22, -24$ 。这些值作为以后分析单历元求解质量的正确值。以 PDOP 最小的 4 颗卫星求解候选坐标及候选模糊度。按 M_1 法求得的基线长与正确值的差值图见图 2(a), 其成功率率为 86%。 M_2 法求解时, 取 $\rho_0 = 0.5$, $\tau_0 = 0.20$ m, 求解的基线差见图 2(b),

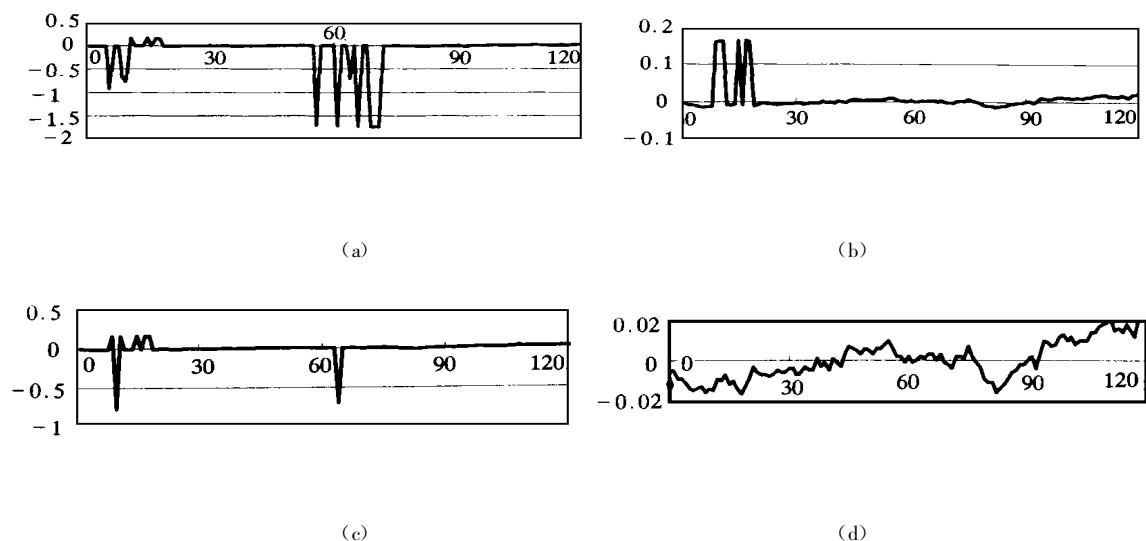


图 2 不同的数据处理算法下的显示结果

Fig. 2 Plots Showing Performance under Different Processing Algorithm

表 3 静态观测、单历元动态解算质量指标表

Tab. 3 Qualities under Different Single Epoch Data Processing for Static Receiver

方法	成功率 k	方差比 R	最小中误差 m_0	AFV	Ka	CPU 运行时间/s
M_1	86%	2.1	0.058	0.88	106	0.18
M_2	93%	4.6	0.058	0.87	7	0.12
M_3	92%	3.0	0.058	0.92	151	0.75
M_4	100%	13.1	0.059	0.92	5	0.61

成功率 93%。 M_3 法求解的基线差见图 2(c), 成功率为 92%。 M_4 法求解的基线差见图 4(d), 求解时, 取 $\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.05$ m, 该法的成功率为 100%。上述 4 种方法的模糊度均值 AFV、最小中误差 m_0 、方差比 R 、候选坐标数 Ka 的均值及每个历元 CPU 运行的时间见表 3。从表 3 可见, M_4 法的成功率、方差比 R 均好于其他方法。由 5 颗卫星候选坐标时, CPU 运行的时间虽增加了, 但提高了成功率。对于该例, 由 M_4 求得的静止期间的 x 、 y 、 h 方向单历元值与真值的差值见图 3; 其解算的精度为: $\sigma_x=\pm 8$ mm, $\sigma_y=\pm 9$ mm, $\sigma_h=\pm 14$ mm。

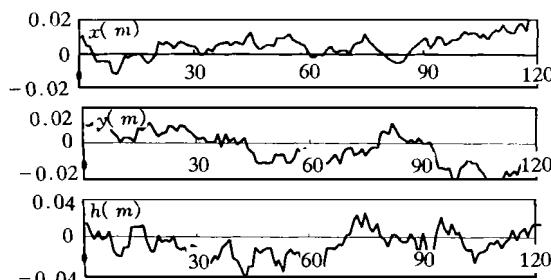
图 3 基线 BJL-C250 M_4 法, x 、 y 、 h 差值

Fig. 3 Coordinate Change of Every Epoch Observation

表 4 动态观测、单历元动态解算质量指标表

Tab. 3 Qualities under Different Single Epoch Data Processing for Moving Receiver

方法	成功率 k	方差比 R	最小中误差 m_0	AFV	Ka	CPU 运行时间/s
M_1	4%	3.0	0.011	0.82	363	0.49
M_2	78%	9.2	0.028	0.91	16	0.09
M_3	37%	4.1	0.020	0.993	521	1.20
M_4	100%	45.8	0.029	0.989	10	0.65

该试验是紧接着试验 2 进行的。上述水平位移试验后, 保持卫星锁定, 将流动接收机天线固定在一测距仪对中杆上。将对中杆整平后, 缓慢升降对中杆以模拟垂直位移变形, 共动态观测 190 个历元。解算结果为: M_1 法的成功率为 29%, M_2 法为 82%, M_3 法为 70%, M_4 法为 100%。

试验 2: 以水平位移为主要变形特征的动态观测, 动态解算。

该试验在基线 JGL-BY 上进行, 采样间隔为 2 s, 截止高度角 15°, 卫星数 7 颗。监测点上的接收机先静态观测 26 min (1~780 历元), 然后监测点的接收机在一水平平台上作来回水平移动 (781~960 历元), 移动范围为 $[-0.20$ m, 0.20 m]。由于监测点周围有一无线电台的电磁波干扰, 收不到 L_2 信号, 只有 L_1 观测值。该基线静态解算长度为 702.013 m, L_1 双差模糊度为 -42、-13、-63、-45、-55、33。用上述 4 种方法进行求解, 得出动态观测期间 200 个历元的几项质量指标的平均值, 见表 4。由表 4 可见, M_4 法的成功率为 100%, 且其候选模糊度向量个数最少, 可区分度指标 R 最好。求解时, 取 $\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.05$ m。 M_2 法求解时, 取 $\rho_0=0.5$, $\tau_0=0.20$ m。由 M_4 法求得的静止期间的 x 、 y 、 h 方向单历元值与真值的差值见图 4。由 M_4 法求得该基线的单历元精度为: $\sigma_x=\pm 6$ mm, $\sigma_y=\pm 4$ mm, $\sigma_h=\pm 9$ mm。动态观测期间求得的 x 、 y 、 h 方向的变形见图 5。

试验 3: 以垂直位移为主要变形特征的单历元算法模拟试验。

M_2 解算时, $\rho_0=0.5$, $d_0=0.10$ m。 M_4 解算时, $\rho_0=0.5$, $d_0=0.05$ m。本试验又一次验证了本文所述方法的正确性和有效性。值得注意的是, 试验 2 和试验 3 均只用到 L_1 观测值, 而无 L_2 观测值, 这说明本文所述的方法对单频机同样有效。 M_4 法求出的变形值见图 6。

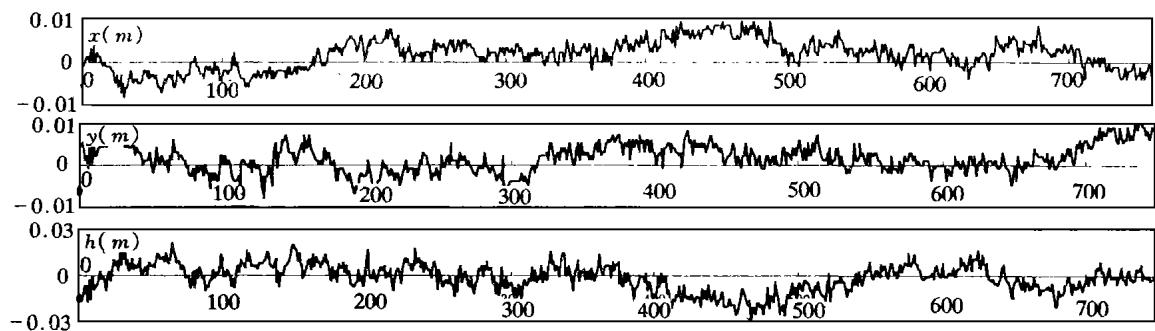
图4 基线JGL-BY, x 、 y 、 h 差值

Fig. 4 Coordinate Change of Every Epoch Observation

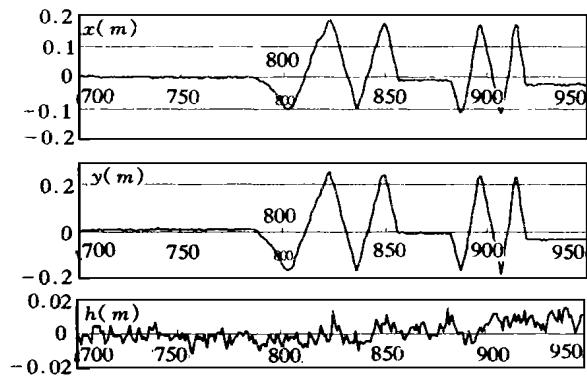


图5 以水平位移为主的变形曲线

Fig. 5 Horizontal Deformation Chart of Every Epoch

参 考 文 献

- 1 Dragert H, Chen X, Kouba J. GPS Monitoring of Crustal Strain in Southwest British Columbia with the Western Canada Deformation Array. *Geomatica*, 1995, 49(3): 301 ~ 313
- 2 Collier P A. Kinematic GPS for Deformation Monitoring. *Geomatica* 1997, 51(2): 157 ~ 168
- 3 陈永奇, Lutes J. 单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 324 ~ 328
- 4 罗志才, 陈永奇, 刘焱雄. GPS 用于监测高层建筑动态

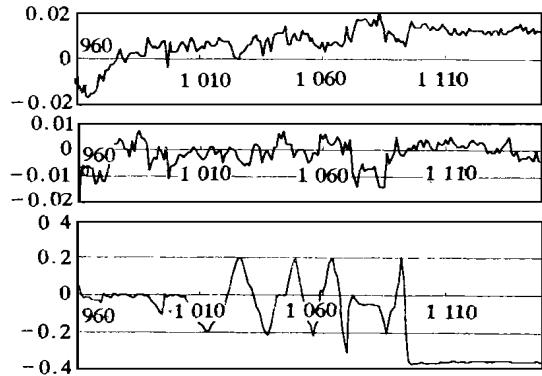


图6 以垂直位移为主的变形曲线

Fig. 6 Vertical Deformation Chart of Every Epoch

- 特征的模拟研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25 (2): 100 ~ 104
- 5 过静玉. 利用 GPS 监测高大建筑动态位移法研究. 工程勘察, 1997(3): 48 ~ 51
 - 6 Mok E. Reliable Single Epoch GPS Processing Algorithm for Static Deformation Monitoring. *Geomatics Research Australasia*, 1999(70): 95 ~ 117
 - 7 Corbett P A, Cross P A. GPS Single Epoch Ambiguity Resolution. *Survey Review*, 1995, 149 ~ 160

作者简介: 熊永良, 副教授, 现从事 GPS 数据处理。代表成果: 变形监测网的二类优化设计。

E-mail: ylxiong @home. swjtu. edu. cn

A Reliable GPS Single Epoch Processing Algorithm with Known Deformation Interval Constraints

XIONG Yongliang¹ HUANG Dingfa¹ ZHANG Xianzhou¹

(1 Department of Surveying and Mapping, Southwest Jiaotong University, 111 Erhuan Road, Chengdu, China 610031)

Abstract: With the constructing of large buildings such as tall buildings, large bridges, TV towers, etc, the deformation monitoring for these buildings is becoming more and more important. Traditional surveying methods are difficult in the safety monitoring of buildings continuously and automatically. GPS is an efficient tool for deformation monitoring. The mode of surveying for deformation may be static, fast static, kinematic or real-time kinematic (RTK). The processing methods for these modes of operation can be categorized as ambiguity resolution approach. They have one common, important constraint: they are multi-epoch algorithms. For many engineering sites, where the signal may be interrupted and cycle slips occur quite frequently, the above methods have difficulty in resolution of ambiguity. Then the research attention has been focused on single epoch processing techniques, which are independent on cycle slips. This algorithm is based on the AFM (ambiguity function method). AFM has the advantage of insensitivity to integers therefore no ambiguity resolution is required.

Traditional single epoch processing algorithm has such problems as less chances for success, bad reliability and separability, etc. The less success chances results from low accuracy of trial positions, less redundancy of observable, low signal to noisy ratio (SNR) and multi-path effects. After analyzing the problems of current GPS single epoch processing algorithms, the paper presents a reliable GPS single algorithm with height difference constraints or horizontal position constraints for deformation monitoring. When the main deformation is in horizontal direction (such as tall buildings, TV towers, and tall chimneys), the height difference constraints can be used for the search of the optimal position. With the addition of the height difference constraints, the search box become a much more flat one. When the main deformation is in vertical direction (such as long-span suspense bridges, cable-stayed bridges), the horizontal position constraints can be used for the search of optimal position. With the addition of horizontal constraints the research box become very slender. Therefore with the involvement of the proposed constraints, the number of candidates is reduced sharply and the optimal position, which can not be found by traditional algorithm, now can be correctly solved. When the GDOP is not good, the paper uses 5 satellites to compute the trial positions to advance the accuracy of candidates. The proposed algorithm is effective in building sites, where satellite signals are often interrupted and the number of satellites is not ideal as well as the signals are often contaminated by multi-path. Three examples have shown that the proposed algorithm has high successful rate, good reliability and good separability. Test results also show the proposed algorithm is suitable for both double and single frequency receivers. Three tests show that one epoch of data with 6 to 7 satellites at the mask angle of 15° is sufficient to achieve the accuracy less than 1 cm in horizontal position and less than 2 cm in height with 100% success rate.

Key words: GPS; deformation monitoring; single epoch processing algorithm; constraints