

利用无整周单历元算法进行连续变形监测的试验分析^{* 1}

白征东¹⁾ 任 常¹⁾ 蒋国辉²⁾

(¹⁾清华大学土木工程系地球空间信息研究所,北京 100084)
(²⁾麦格集团,北京 100043)

摘 要 基于小变形静态监测的无整周单历元算法,提出利用高采样率接收机及无整周单历元算法进行连续变形监测的方法。试验验证了这种方法的可行性。

关键词 GPS;无整周单历元算法;连续变形;监测;高采样率接收机

中图分类号:P228

文献分类号:A

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONTINUOUS DEFORMATION MONITORING USING SINGLE EPOCH ALGORITHM WITH IRRESPECTIVE OF CYCLE

Bai Zhengdong¹⁾, Ren Chang¹⁾ and Jiang Guohui²⁾

(¹⁾Institute of Geomatics of Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)
(²⁾Mag Group, Beijing 100084)

Abstract A single epoch algorithm with irrespective of cycle was presented to be used to continuous deformation monitoring with a high sampling rate receiver. The feasibility of this approach is proved by experiments.

Key words:GPS; single epoch algorithm; continuous deformation; monitor; high sampling rate receiver

1 引言

GPS 技术已经广泛应用于变形监测各个领域,并且提出了适用于小变形监测的无整周单历元算法^[1-3],这种算法的优点在于不需要进行周跳的探测和修复,只需要一个历元的观测数据就可以进行变形信息的解算。本文在分析这种算法特点的基础上,提出利用高采样率接收机和无整周单历元算法进行连续变形监测,并通过试验验证了这种方法的可行性。

2 无整周单历元算法的数学模型

如图 1 所示,A 为基准点,C 为变形监测点, i, j 为卫星,在 A 点和 C 点建立载波观测方程为^[4-7]:

$$\begin{cases} \lambda_m L_{m,A}^k = \rho_{m,A}^k + \Delta t_A^k - \Delta t^k + \Delta r_A^k + \Delta T_A^k + \Delta I_{m,A}^k + \\ \quad u_{m,A} - u_m^k + \lambda_m n_{m,A}^k + \Delta P_{m,A}^k + \varepsilon_{L_{m,A}^k} \\ \lambda_m L_{m,C}^k = \rho_{m,C}^k + \Delta t_C^k - \Delta t^k + \Delta r_C^k + \Delta T_C^k + \Delta I_{m,C}^k + \\ \quad u_{m,C} - u_m^k + \lambda_m n_{m,C}^k + \Delta P_{m,C}^k + \varepsilon_{L_{m,C}^k} \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ_m 为波长, L_m^k 为载波观测值, ρ_m^k 为 m 频率上卫星天线相位中心在信号发射时刻的位置与接收机天线相位中心在信号接收时刻的位置之间的几何距离, Δt_k 为接收机钟差, Δt^k 为卫星钟差, Δr_k^k 为相对论效应, ΔT_k^k 为对流层延迟, ΔI_m^k 为电离层延迟, u_m 、 u_m^k 为接收机和卫星未标定的相位延迟 (UPD), n_m^j 为整周模糊度, ΔP_m^i 为天线相位绕转, $\varepsilon_{L_m^k}$ 为观测噪声, $k = i, j$ 。

* 收稿日期:2013-03-09

基金项目:科技部 863 计划项目([2012]38);国家发展与改革委员会计划项目([2012]2083)

作者简介:白征东,男,1968 年生,副教授,主要研究方向为大地测量、卫星导航与定位。E-mail:zbai@tsinghua.edu.cn

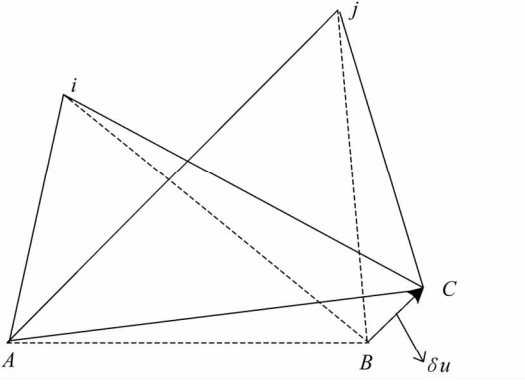


图 1 原理示意图

Fig. 1 Diagram of principle

若 A 点和 C 点之间距离很短,组成双差观测方程后各项误差得到很好的消除,忽略观测噪声后有

$$\Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} = \Delta \nabla \rho_{m,AC}^{ij} / \lambda_m + \Delta \nabla n_{m,AC}^{ij} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} (L_{m,C}^j - L_{m,A}^i) - (L_{m,A}^j - L_{m,A}^i) &= \Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} \\ (\rho_{m,C}^j - \rho_{m,A}^i) - (\rho_{m,A}^j - \rho_{m,A}^i) &= \Delta \nabla \rho_{m,AC}^{ij} \\ (n_{m,C}^j - n_{m,A}^i) - (n_{m,A}^j - n_{m,A}^i) &= \Delta \nabla n_{m,AC}^{ij} \end{aligned}$$

A 点为基准点,利用首期观测可以得到其精确坐标, C 点变形点,其坐标会变化,只能利用首期观测得到其近似坐标点 B ,记 B 点坐标为 $[x_B, y_B, z_B]$, B 点和 C 点间的位移即为待求变形量,记为

$$\delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z] \quad (3)$$

记 A 点坐标为 $[x_A, y_A, z_A]$, 卫星 i 坐标为 $[x_i, y_i, z_i]$, 卫星 j 坐标为 $[x_j, y_j, z_j]$, 有

$$\begin{aligned} \Delta \nabla \rho_{m,AC}^{ij} - \Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij} &= \\ \sqrt{(x_j - x_B - \Delta x)^2 + (y_j - y_B - \Delta y)^2 + (z_j - z_B - \Delta z)^2} - \\ \sqrt{(x_i - x_B - \Delta x)^2 + (y_i - y_B - \Delta y)^2 + (z_i - z_B - \Delta z)^2} - \\ \sqrt{(x_j - x_B)^2 + (y_j - y_B)^2 + (z_j - z_B)^2} + \\ \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2 + (z_i - z_B)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

当 δu 很小时,式(4)在 $[\Delta x, \Delta y, \Delta z] = [0, 0, 0]$ 处进行泰勒展开,忽略高阶项后得

$$\begin{aligned} \Delta \nabla \rho_{m,AC}^{ij} - \Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij} &= \\ - (l_B^j - l_B^i) \Delta x - (m_B^j - m_B^i) \Delta y - (n_B^j - n_B^i) \Delta z \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$k = i, j$$

$$l_B^k = \frac{x_k - x_B}{\sqrt{(x_k - x_B)^2 + (y_k - y_B)^2 + (z_k - z_B)^2}}$$

$$m_B^k = \frac{y_k - y_B}{\sqrt{(x_k - x_B)^2 + (y_k - y_B)^2 + (z_k - z_B)^2}}$$

$$n_B^k = \frac{z_k - z_B}{\sqrt{(x_k - x_B)^2 + (y_k - y_B)^2 + (z_k - z_B)^2}}$$

当变形量 δu 很小时,有

$$\begin{aligned} \Delta \nabla n_{m,AC}^{ij} &= \text{round}(\Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} - \Delta \nabla \rho_{m,AC}^{ij} / \lambda_m) = \\ &= \text{round}(\Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} - \Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij} / \lambda_m) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\text{round}()$ 为四舍五入取整函数。

将式(5)、(6)代入式(2)后可得

$$\begin{aligned} \Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} - \frac{\Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij}}{\lambda_m} - \text{round}(\Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} - \frac{\Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij}}{\lambda_m}) \\ = \frac{-(l_B^j - l_B^i) \Delta x - (m_B^j - m_B^i) \Delta y - (n_B^j - n_B^i) \Delta z}{\lambda_m} \end{aligned} \quad (7)$$

改成误差方程形式后有

$$\begin{aligned} V = - (l_B^j - l_B^i) \Delta x - (m_B^j - m_B^i) \Delta y - (n_B^j - n_B^i) \Delta z - \\ \lambda_m \left[\Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} - \frac{\Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij}}{\lambda_m} - \text{round}(\Delta \nabla L_{m,AC}^{ij} - \frac{\Delta \nabla \rho_{m,AB}^{ij}}{\lambda_m}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)即为无整周单历元算法解算变形量的误差方程,待求参数为 $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]$, 由于采用了双差观测方程,因此当共视卫星数大于等于 4 颗时便可以解算变形。

3 连续变形监测方法

由推导可以看出无整周单历元算法在解算过程中必须要知道监测点的近似坐标,笔者对监测点近似坐标的精度是否会影响变形信息的解算进行了验算。利用已有的短基线数据,其参考站与流动站的坐标精确已知,将流动站作为变形监测的监测站,利用无整周单历元算法计算某历元监测点相对于已知坐标的变形量为 $[2.7, 0.2, 1.9] \text{ mm}$ (此变形量应为 $[0, 0, 0]$), 然后对监测点初始坐标增加半径为 20 mm 的球面坐标改变量,计算根据不同初始坐标计算出的相对于已知坐标的变形量如图 2 所示。

图 2 中的颜色代表计算出的坐标相对于已知坐标的距离,可以看出,当初始坐标在小范围内变动时,根据不同初始坐标计算出的变形量与根据精确

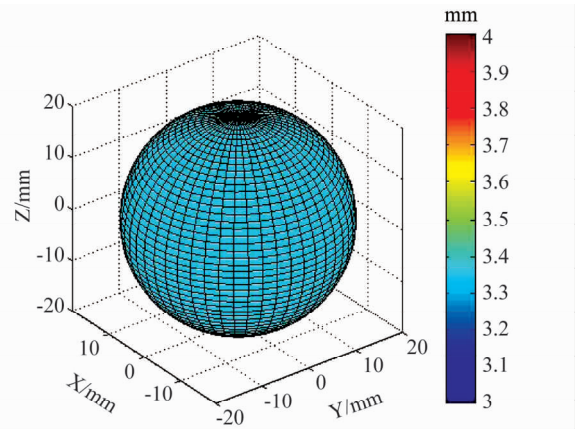


图 2 不同初始坐标计算出的变形量

Fig. 2 Deformation calculated with different initial coordinates

坐标计算出的变形量一致,均为

$$\sqrt{2.7^2+0.2^2+1.9^2}=3.3\text{ mm}$$

记初始坐标为 U , 初始坐标变动量为 ε , Δu_U 表示利用无整周单历元算法计算出的相对于坐标 U 的变形量, 如果基线较短并且初始坐标变动量 ε 较小时有 $\Delta u_U = \Delta u_{U+\varepsilon} + (U + \varepsilon) - U$ 即

$$\Delta u_U = \Delta u_{U+\varepsilon} + \varepsilon \tag{9}$$

在连续变形监测中, 在历元 1 可以计算出相对于坐标 U 的变形量 δu_1 , 在历元 2 由于监测点与坐标 U 可能相差较大, 无法将 U 作为初始坐标进行变形解算, 但由于位移具有连续性, 历元 2 与历元 1 间的变形可能会相对小, 因此可以在历元 2 利用无整周单历元算法计算出相对于初始坐标 $U + \delta u_1$ 的变形量 δu_2 , 由式(9)可知历元 2 相对于坐标 U 的变形量为

$$\Delta u_U = \Delta u_{U+\delta u_1} + \delta u_1 = \delta u_2 + \delta u_1 \tag{10}$$

并且历元 1 变形的解算误差不会对历元 2 的变形解算带来误差, 因为初始坐标在准确坐标小范围内变化时并不影响变形解算。

利用式(10)进行连续变形解算时需要保证每个历元的变形较小, 在实际中往往无法控制变形大小, 但可以通过高采样率的接收机缩小相邻历元的时间间隔减小每个历元的位移, 从而通过实时更新初始坐标就可以利用无整周单历元算法进行连续变形解算。

4 试验分析

试验于 2013 年 4 月在清华大学土木工程系地球空间信息研究所楼顶进行。在楼顶设置一基准点和一监测点, 基线长度 8 m。采用两台 Trimble 双频接收机进行观测数据采集, 接收机采样率设置为 10 Hz。

试验 1: 将监测点接收机安置在一可做往复运动的平台上, 首先静止观测 5 分钟左右, 然后让监测点接收机沿东西方向做振幅约 10 cm 的往复运动, 利用无整周单历元算法进行连续变形解算, 结果如图 3~5 所示。

从图 3~5 可以看出, 利用该方法准确地解算出了东西方向的往复运动, 南北方向和高程方向的变形均比较稳定, 单历元解算误差均在 1 cm 以内。值得说明的是, 如果不根据上一个历元更新初始坐标, 在振幅较大处由于不满足相对于初始坐标的小变形要求, 利用未改进的无整周单历元算法就不能解算正确的变形信息。

试验 2: 将监测点接收机仍安置在该平台上, 开

始静止观测 6 分钟左右, 然后将监测接收机沿东西方向移动, 最大移动量约 0.8 m, 利用该方法解算出的东西方向变形如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 利用这种方法可以很好地解算出连续的大变形。

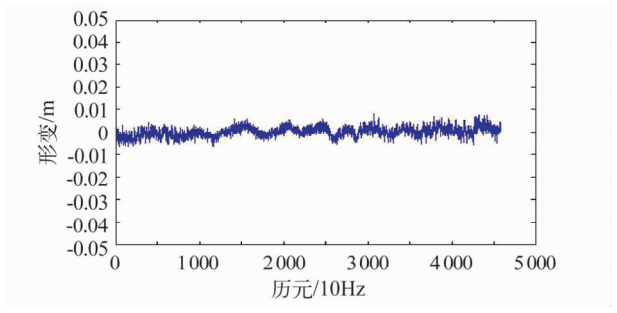


图 3 N 方向变形
Fig. 3 Deformation of N direction

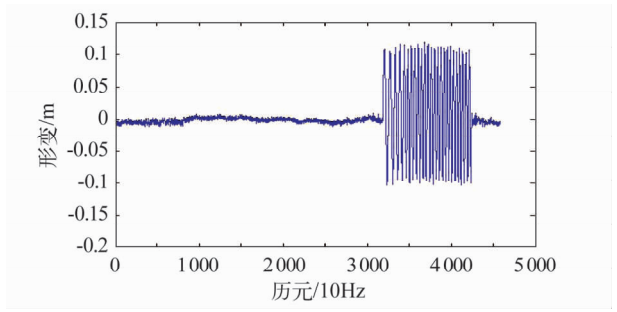


图 4 E 方向变形
Fig. 4 Deformation of E direction

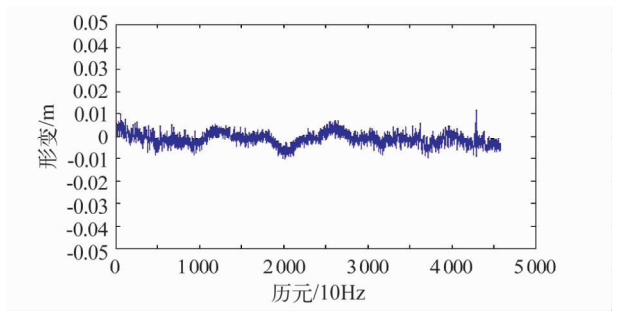


图 5 U 方向变形
Fig. 5 Deformation of U direction

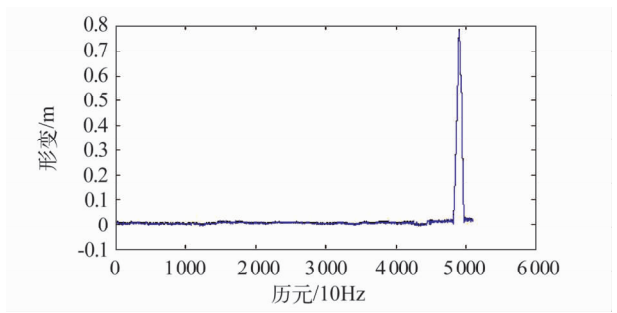


图 6 E 方向连续大变形
Fig. 6 Continuous large deformation of E direction

5 总结

根据适用于小变形监测的无整周单历元算法在监测点初始坐标有小扰动时并不影响变形信息的解算这一特点,提出了可以利用高采样率接收机进行数据采集,实时利用前一个历元解算出的变形更新下一个历元的初始坐标,从而利用无整周单历元算法进行连续变形监测,试验验证了这种方法是可行的。

参 考 文 献

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(信息科学版),2001,(5):451-454. (Zhang Xiaohong, Li Zhenghang and Xu Shaoquan. Study on the method and the model for high accuracy deformation monitor with GPS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2001(05):451-454)

2 李征航,张小红,朱智勤. 利用 GPS 进行高精度变形监测的新模型[J]. 测绘学报,2002,31(3):206-210. (Li Zhenghang, Zhang Xiaohong and Zhu Zhiqin. A new model of high accuracy deformation monitoring with GPS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(3):206-210)

3 楼益栋,李征航,张小红. 无模糊度和整周跳变问题的短基线解算方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2005(11):995-997. (Lou Yidong, Li Zhenghang and

Zhang Xiaohong. A method of short baseline solution without cycle slip detection and ambiguity resolution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005,(11):995-997)

4 李厚芝. 单基准线向量解算法在 GPS 变形监测中的应用[J]. 测绘科学,2007(06):137-139. (Li Houzhi. Application of single baseline vector solution to GPS deformation monitoring[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007,(6):137-139)

5 李波,葛永慧. 单历元 GPS 变形监测数据处理与系统研制[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2007(02):169-170. (Li Bo and Ge Yonghui. Study on data processing method and system in GPS deformation monitoring[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2007,(2):169-170)

6 王新洲,花向红,邱蕾. GPS 变形监测中整周模糊度解算的新方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,(1):24-26. (Wang Xinzhou, Hua Xianghong and Qiu Lei. A new method for integer ambiguity resolution in GPS deformation monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,(1):24-26)

7 李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009. (Li Zhenghang and Zhang Xiaohong. New techniques and precise data processing methods of satellite navigation and positioning[M]. Wuhan:Wuhan University Press,2009)

(上接第 95 页)

13 马开锋,彭碧波,洪樱. 基于卫星轨道特征的低轨卫星星历参数拟合法[J]. 大地测量与地球动力学,2007,(1):85-90. (Ma Kaifeng, Peng Bibo and HongYing. LEO satellite ephemeris parameters fitting method based on orbit character of satellite[J]. Journal of Geodesy and Geodynamic,2007,(1):85-90)

14 崔先强,等. 用基于 Givens 变换的 QR 分解计算类 GPS 广播星历参数[J]. 测绘工程,2006,15(4):5-8. (Cui Xianqiang, et al. Solving similar GPS broadcast ephemeris parameters using givens transformation[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2006,15(4):5-8)

15 崔先强. 参数加权的 Givens 变换算法及其在导航卫星广播星历拟合中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(3):147-150,159. (Cui Xianqiang. Givens transformation with weighted parameter and its application in navigation satellite broadcast ephemeris fitting[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,(3):147-150,159)

16 崔先强,等. 两种 GPS 广播星历参数算法的比较[J]. 空间科学学报,2006,26(5):382-387. (Cui Xianqiang, et al. Comparisons of two kinds of GPS broadcast ephemeris parameter algorithms[J]. Chinese Journal of Space Science,2006,26(5):382-387)