

文章编号:1001-1595(2011)01-0015-07

开窗分类因子抗差自适应序贯平差用于卫星钟差参数估计与预报

黄观文¹, 杨元喜², 张勤¹

1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国卫星导航定位与应用管理中心, 北京 100088

Estimate and Predict Satellite Clock Error Using Adaptively Robust Sequential Adjustment with Classified Adaptive Factors Based on Opening Windows

HUANG Guanwen¹, YANG Yuanxi², ZHANG Qin¹

1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. China National Administration of GNSS and Applications, Beijing 100088, China

Abstract: It is proposed that a novel clock error estimation and prediction algorithm—adaptively robust sequential adjustment with classified adaptive factors based on opening windows. The main ideas are firstly one dimensional clock error series are processed to eliminate the gross errors with robust equivalence weight estimation in opening windows, where adaptive factors are used between windows to reduce the anomaly of clock errors. Secondly, as for the different satellite clocks, based on their different error characteristics, the classified adaptive factors are adapted to mitigate the effects from clock outliers. Tests indicate as for the fitting precision and prediction precision, the new proposed algorithm can improve 78.9% and 60.4% respectively by comparing with no robust estimation method. Besides, even for the robust estimation, classified factors method are better than single factor method, tests show about 4.3% and 29.2% improvement in fitting precision and prediction precision respectively. **Key words:** open windows; classified factors; sequential adjustment; adaptively robust; satellite clock error; predict

摘要: 提出一种新的钟差算法——开窗分类因子抗差自适应序贯平差,即首先对一维钟差数据进行开窗处理,在窗口内利用抗差等价权削弱粗差影响,在窗口间构造自适应因子抵制钟跳异常,从而达到消除和削弱观测异常和状态异常的目的。针对不同星钟参数不符值描述不同的扰动特性,提出构造分类自适应因子来抵制钟差时间序列中的扰动异常。计算结果表明,新算法一方面引入抗差估计,控制了粗差影响,拟合精度和预报精度与没有进行抗差处理的自适应序贯平差相比,分别提高78.9%和60.4%;另一方面由于新算法构造分类自适应因子,分别处理不同特征的状态异常,钟差拟合精度和预报精度与单因子抗差自适应序贯平差相比,分别提高4.3%和29.2%。

关键词: 开窗;分类因子;序贯平差;抗差自适应;卫星钟差;预报

中图分类号: P228

文献标识码: A

基金项目: 国家863计划(2007AA12Z331);国家自然科学基金(40902081, 40774001, 40841021)

1 引言

卫星导航精确位置测量实际上是精确时间测量,高精度的卫星钟是导航系统的基础,利用卫星导航系统实现快速定位和时间同步,需要知道精确卫星钟时间参数,因此也就需要对卫星钟的星钟参数进行估计和预报。针对卫星钟差模型(如线性模型、多形式模型、指数模型等),国内外很多学者进行了研究,并取得了显著的效果^[1-6]。但這些方法大多使用最小二乘估计多项式系数。而最小二乘本身不具有抗差性,且容易受状态扰动的影响,钟差数据又往往含有粗差和钟跳,一般采用数据预处理的方法,包括相位数据和频率数据转

换、图示法、粗差探测法等^[7],这些方法都是事后处理,且需人工判断,自动化程度较低,无法满足实时参数估计和预报的要求,这也使得常规最小二乘模型在钟差参数计算和预报工作中存在局限性。针对这些问题,本文首先将钟差序列分成大小相同的单个数据窗口,利用抗差估计法解决一维钟差序列难以直接进行抗差自适应估计的问题^[8-10],并讨论了不同窗口大小的钟差解性质。其次构造分类自适应因子自动识别因钟跳现象导致的状态异常,通过分类因子抗差自适应序贯平差进行钟差拟合和预报。最后通过算例分析,验证了本文算法的优越性和有效性。

2 钟差模型

进行卫星钟差估计,首先需要构造精密钟差模型,而准确表征卫星钟时频域稳定性的因素通常包括相位、频率、频漂(老化率)等,因此,一般选用包含这三种因素的二次多项式模型作为钟差模型,事实上,GPS导航文件的卫星钟差也正是基于这三种因素构成。二次多项式钟差拟合模型如下

$$\Delta t_i = a_0 + a_1(t - t_{\alpha}) + a_2(t - t_{\alpha})^2 + v_i \quad (1)$$

式中, a_0, a_1, a_2 为星钟参数,对应钟差(相位)、钟速(频率)和钟漂(频漂); t_{α} 为卫星钟参考时间; Δt_i 为钟差观测值。

对式(1)直接进行最小二乘求解,即可获得星钟参数,而在实际工作中,由于原子钟观测数据量较大,本文采用运算效率更高、解算结果等价的序贯平差进行求解^[11]。

原子钟测量过程中,由于受断电、设备故障和外部干扰等因素影响^[10],获得的钟差观测数据会不可避免地存在数据中断、相位跳变和粗差等,这种异常会直接影响钟差参数估计和预报的精度。因此,为了抵制这些异常对钟差拟合预报的影响,本文引入自适应抗差序贯平差来消除或减弱这些异常的影响^[12-13]。标准的自适应抗差序贯平差采用单一自适应因子来调节预报信息对参数估值的贡献,而在钟差序列中,状态异常往往受某个参数或某几个参数影响,若直接采用单因子自适应序贯平差,必将降低预报信息的准确率。基于钟差、钟速和钟漂不符值都可以单独用来控制状态扰动异常对参数估值的影响^[14],且不同参数描述不同的钟差扰动特性,因此,提出构造分类自适应因子来抵制钟差扰动异常。

3 分类因子自适应抗差序贯平差原理

3.1 自适应抗差序贯平差

钟差拟合模型(1)可写成如下简化形式

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L}, \mathbf{P} \quad (2)$$

式中, $\hat{\mathbf{X}}$ 为三个星钟参数; \mathbf{A} 为设计矩阵; \mathbf{L} 为钟差观测值; \mathbf{V} 观测值残差; \mathbf{P} 为观测权阵。

设参数向量 \mathbf{X} 有先验估值 $\hat{\mathbf{X}}^0$ 、先验协方差矩阵 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}^0}$ (或权阵 $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}^0}^{-1}$),则有序贯平差解为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{X}} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \hat{\mathbf{X}}^0) \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当参数先验估值 $\hat{\mathbf{X}}^0$ 和观测向量 \mathbf{L} 存在异常误差时,必然对序贯平差结果产生影响。为控制

这些异常对解算结果的影响,借鉴自适应滤波思想^[15-17],构造抗差自适应序贯平差法进行参数求解,具体求解过程见文献^[17],这里不再赘述。

利用上述思想,可得抗差自适应序贯平差解为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}} &= (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{L} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \hat{\mathbf{X}}^0) \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}} &= (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\bar{\mathbf{P}}$ 为当前观测向量的抗差等价权; $\bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0}$ 为先验参数的等价权矩阵; $\bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} = \mathbf{W}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \mathbf{W}^{\frac{1}{2}}$; \mathbf{W} 为自适应调整矩阵^[18]。 \mathbf{W} 通常可采用单因子确定,此时 \mathbf{W} 为 1×1 维矩阵。

\mathbf{W} 矩阵中的单因子元素 w 通常可采用三段函数^[19]、两段函数^[20]、指数函数^[21]确定。

其中,三段函数自适应因子确定如下

$$w = \begin{cases} 1 & |\Delta \tilde{\mathbf{X}}| \leq k_0 \\ \frac{k_0}{|\Delta \tilde{\mathbf{X}}|} \left(\frac{k_1 - |\Delta \tilde{\mathbf{X}}|}{k_1 - k_0} \right)^2 & k_0 < |\Delta \tilde{\mathbf{X}}| \leq k_1 \\ 0 & |\Delta \tilde{\mathbf{X}}| > k_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, k_0, k_1 为控制常量, k_0 一般取 $1.5 \sim 2.5$, k_1 一般取 $3.0 \sim 8.0$; $|\Delta \tilde{\mathbf{X}}|$ 为标量形式,具体值可通过式(6)进行求解。

$$|\Delta \tilde{\mathbf{X}}| = \|\tilde{\mathbf{X}} - \hat{\mathbf{X}}^0\| / \sqrt{\text{tr}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}^0})} \quad (6)$$

式中, $\tilde{\mathbf{X}}$ 为当前观测量的抗差最小二乘参数解向量; $\hat{\mathbf{X}}^0$ 为参数先验值(或预报值)向量; $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}^0}$ 为参数先验方差矩阵; $\text{tr}(\cdot)$ 为矩阵求迹表达式。

在抗差自适应序贯平差中,观测等价权元素和自适应因子的确定是整个算法的关键,观测等价权元素直接反映了自适应抗差滤波算法对观测异常的控制能力;自适应因子不仅反映钟差信息、钟速信息和钟漂预报信息对参数估值的贡献大小,而且反映了算法对扰动异常的控制效果。

3.2 分类自适应因子确定

鉴于钟差、钟速和钟漂不符值描述不同的钟差扰动特性,提出构造分类自适应因子来钟差扰动异常。此时,自适应因子分为三类:钟差自适应因子(w_1)、钟速自适应因子(w_2)和钟漂自适应因子(w_3),自适应因子调整矩阵 \mathbf{W} 的形式如下

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 \\ 0 & 0 & w_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

w_1 的构造过程如下:首先类似式(6)构造钟差不符值统计量 $|\Delta \tilde{\mathbf{X}}_1|$,此时式(6)中的 $\tilde{\mathbf{X}}$ 和 $\hat{\mathbf{X}}^0$ 应为钟差参数的抗差最小二乘值 $\tilde{\mathbf{X}}_1$ 和预报值 $\hat{\mathbf{X}}_1^0$, $\text{tr}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1^0})$ 为 $\hat{\mathbf{X}}_1^0$ 的方差阵元素 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}_1^0}$;其次利用式(5)可确定自

适应因子 ω_1 。 ω_2 和 ω_3 的构造过程类似 ω_1 。

3.3 窗口设计

钟差观测数据是一维数据,构造的观测模型是二次多项式模型,显然直接进行序贯平差很难控制异常观测的影响,进而很难区分观测异常和状态扰动,因此也就很难可靠确定自适应因子。实际钟差数据中经常出现大的钟跳和粗差,因此钟差序列的异常观测必须得到有效处理,才能为后续稳定性分析^[22]、拟合预报等工作打下基础。鉴于此,本文提出对钟差序列进行开窗处理,即将 n 个钟差观测数据分成 i 个窗口,每个窗口大小为 m ,具体分割形式如图 1。对每个窗口内的观测数据独立进行最小二乘拟合,窗口之间进行序贯平差求解,理论上,这种开窗序贯平差与整体平差是完全等价的。

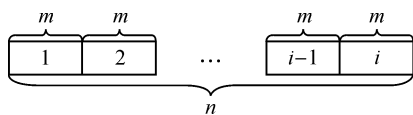


图 1 窗口大小设计

Fig. 1 Design of window size

窗口大小 m 的设计是本文研究的关键, m 若小于 4,则无法直接利用当前观测实现抗差估计, m 设计的过大,则容易包括过多的状态扰动,造成自适应因子不准确。通过对大量 GPS 钟差产品分析,发现卫星钟的绝大多数钟跳均发生在天与天之间。同时考虑到 IGS 产品是单天计算,其基准站接收机钟受码的噪声、温度、多路径等因素影响,在天与天之间存在天跳变(day-boundary)^[23-25],从而直接影响卫星钟差数据。因此,本文认为 $m=96$ (.SP3 文件)或 $m=288$ (.clk 文件)较为合适,即窗口的大小设计为 1 d。

m 的大小,对应不同性质的参数估计形式:

(1) 当 $m=1$ 时,可直接实现钟差单因子自适应序贯平差解,无抗差功能

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \hat{\mathbf{X}}^0),$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} = \omega_1^{-\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \omega_1^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

(2) 当 $m=2$ 时,可直接实现钟差、钟速分类因子自适应序贯平差解,无抗差功能

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \hat{\mathbf{X}}^0),$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

(3) 当 $m=3$ 时,可直接实现钟差、钟速、钟漂分类因子自适应序贯平差解,无抗差功能

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \hat{\mathbf{X}}^0),$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

(4) 当 $3 < m < n$ 时,可实现钟差、钟速、钟漂分类因子抗差自适应序贯平差

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0})^{-1} (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{L} + \bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \hat{\mathbf{X}}^0),$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{\hat{\mathbf{X}}^0} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}^0} \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

(5) 当 $m=n$ 时,为抗差最小二乘解,无自适应功能

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{L} \quad (12)$$

事实上, $m=1$ 时,通过当前观测钟差 \tilde{X}_1 与预报钟差 \tilde{X}_1^0 之差以及采样间隔 τ ,也可间接获得当前钟速估值

$$\tilde{X}_2 = \frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_1^0}{\tau} \quad (13)$$

基于计算的钟速估值和预报速度,也可以间接构造钟速信息的自适应因子。同理,当 $m=2$,通过间接获得钟漂的当前估值,一样可获得钟漂信息的自适应因子。但考虑到间接构造自适应因子一方面依赖预报值,与预报值存在相关性,同时当前观测值没有进行抗差处理,很难区分观测异常和状态扰动,所以文中没有采用间接构造的自适应因子方案。

4 算例与分析

本文算例采用 IGS 发布的精密钟差数据 (<http://igscb.jpl.nasa.gov/>) 来进行预报研究。数据采集时间为 2009-02-22—2009-03-05,共计 12 d 的数据,钟差数据的采样间隔为 5 min。考虑到目前 GPS 卫星大部分都搭载的是高精度 Rb 钟,而且我国的北斗二代导航系统配备的也是国产 Rb 钟,本文选择配备 Rb 钟的 6 号卫星作为研究对象,前 10 d 进行参数估计分析,后 2 d 作为预报精度检核数据。

定义钟差预报的均方根差(RMS)为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta \epsilon_i)^2} \quad (14)$$

式中, $\Delta\epsilon_i$ 为实时预报钟差和 IGS 精密钟差的差值; n 为预报钟差的个数。

钟差模型采用二次多项式模型, 窗口大小设计为 288, 抗差估计采用 IGG3 等价权函数^[12], 其中 $c_0 = 1.5, c_1 = 2.5$; 自适应因子构造采用三段函数法^[16]; 控制常量 $k_0 = 1.5, k_1 = 5.0$ 。设计以下四种方案进行对比分析: ① 标准序贯平差 (LS); ② 自适应序贯平差 (ALS); ③ 单因子抗差自适应序贯平差 (ARLS1); ④ 分类因子抗差自适应序贯平差 (ARLS2)。

6 号卫星 10 d 的钟差时间序列如图 2 所示。从图 2 可以看出, 该卫星钟在第 2 天和第 3 天之间发生了一个明显的钟跳, 其钟差、钟速值均发生较大变化; 若不考虑这个钟跳, 势必大大影响拟合预报的精度。另外, 为了有效识别钟差序列中存在的粗差, 去除钟跳后计算得出对应钟差数据的频率时间序列, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 该钟差序列中存在多处明显粗差。为了验证不同方案的拟合精度, 对含有粗差的钟差数据进行预处理, 得到一个“干净”的钟差序列, 作为评价不同方案拟合精度的标准。预处理后得到的频率时间序列如图 4 所示。通过图 4 可以看出, 该钟差序列中已无明显粗差点。

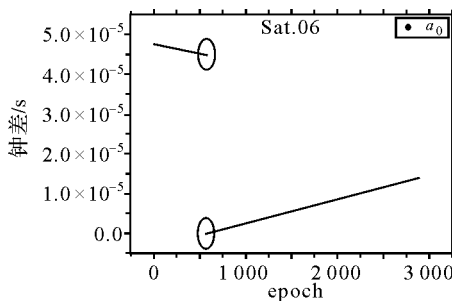


图 2 卫星钟差相位时间序列
Fig. 2 Satellite clock phase data series

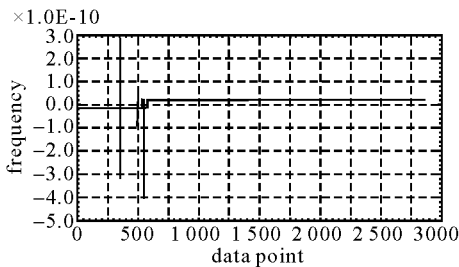


图 3 卫星钟差去除钟跳后的频率时间序列
Fig. 3 Satellite clock frequency data series removed clock jumps

对比方案 1 和方案 2 得到的钟差序列与标准钟差序列如图 5 所示(为了图形直观, 方案 2 的钟差值统一减去 $2.0E-5$)。从图 5 可以看出, 自适应序贯平差能有效识别钟跳异常, 并能做出自动调整, 解算结果不受钟跳影响, 而标准序贯平差方案由于无法处理钟跳, 结果失真。

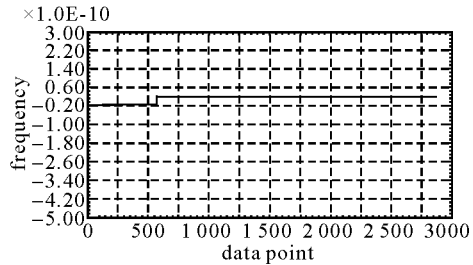


图 4 卫星钟差去除钟跳和粗差后的频率时间序列
Fig. 4 Clock frequency data series removed clock jumps and blunders

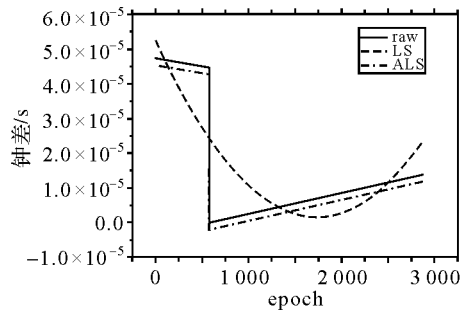


图 5 方案 1 和方案 2 的钟差序列对比
Fig. 5 Contrast results with Scheme 1 and Scheme 2

方案 1 到方案 4 的钟差拟合残差如图 6~图 9 所示, 四种方案钟差拟合精度统计如表 1 所示。

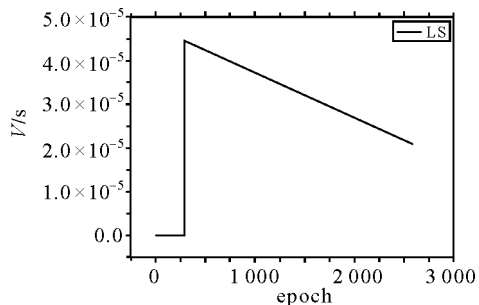


图 6 方案 1 拟合残差
Fig. 6 Residual of scheme 1

通过图 6~图 9 和表 1 可以看出:

(1) 标准序贯平差无法有效处理钟跳和粗差, 拟合结果失真;

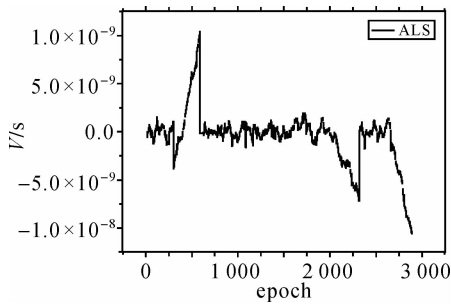


图 7 方案 2 拟合残差
Fig. 7 Residual of scheme 2

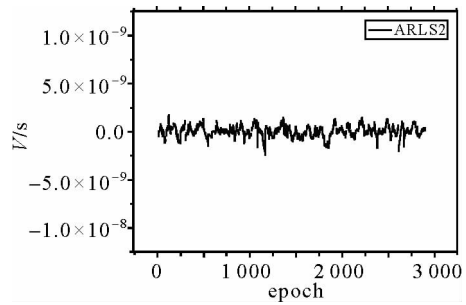


图 9 方案 4 拟合残差
Fig. 9 Residual of scheme 4

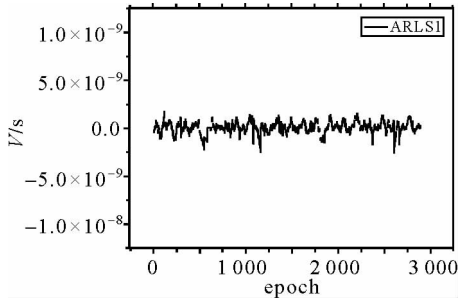


图 8 方案 3 拟合残差
Fig. 8 Residual of scheme 3

(2) 自适应序贯平差通过自适应因子调整, 能有效抑制钟差扰动, 拟合模型精度受其影响较小;

(3) 单因子抗差自适应序贯平差(方案 3)通过观测等价权控制观测粗差的影响, 并且使用自适应因子控制钟跳扰动异常, 拟合精度明显优于没有进行抗差处理的自适应序贯平差(方案 2), 精度提高幅度约为 77.9%;

(4) 分类因子自适应抗差序贯平差(方案 4)由于能够更为可靠地描述钟差序列中的不同扰动特性, 拟合精度最高, 优于单因子自适应抗差序贯平差(方案 3), 精度提高幅度约为 4.3%; 相比没有进行抗差处理的自适应序贯平差法(方案 2), 精度提高幅度约为 78.9%。

为了进一步验证分类因子方案与单因子方案的区别, 给出方案 3 和方案 4 在窗口间的自适应因子数值结果, 如表 2 所示。

表 1 不同方案的钟差估计精度统计

Tab. 1 Statistic estimated RMS of clock error at different schemes

	max	min	mean	RMS
方案 1	2.432 64E-05	-1.137 34E-07	2.907 10E-06	8.893 80E-06
方案 2	1.047 91E-08	-1.060 74E-08	-4.613 05E-10	2.742 86E-09
方案 3	1.657 34E-09	-2.673 54E-09	-1.079 56E-12	6.058 13E-10
方案 4	1.657 34E-09	-2.524 19E-09	-3.450 59E-11	5.796 75E-10

表 2 方案 3 和方案 4 的自适应因子数值

Tab. 2 Adaptive value of scheme 3 and scheme 4

	钟差分类因子 (方案 4)	钟速分类因子 (方案 4)	钟漂分类因子 (方案 4)	单因子自适应 (方案 3)
窗口 2(0289-0576 历元)	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
窗口 3(0577-0864 历元)★	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
窗口 4(0865-1152 历元)	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
窗口 5(1153-1440 历元)	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
窗口 6(1441-1728 历元)	1.000 0	1.000 0	0.347 4	1.000 0
窗口 7(1729-2016 历元)	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
窗口 8(2017-2304 历元)	0.119 8	1.000 0	1.000 0	1.000 0
窗口 9(2305-2592 历元)	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
窗口 10(2593-2880 历元)	1.000 0	0.013 1	0.000 0	1.000 0

注: ★处为出现大钟跳的窗口

从表 2 可以看出:当钟差序列发生大的钟跳时(窗口 3),无论是单因子方案(方案 3)还是分类因子方案(方案 4)均能实现参数估计模型自动调节,自适应因子为 0,从而使得后续窗口参数估计结果不受钟跳影响。而当钟差序列出现小的异常时,方案 3 只能利用整体参数结果确定自适应因子,无法区别个别参数出现的状态异常情况(窗口 6、窗口 8、窗口 10)。方案 4 由于采用分类因子分别描述不同钟差参数的状态异常,进而做出自适

应调整,因此当钟差参数(窗口 8)、钟速参数(窗口 10)、钟漂参数(窗口 6)分别发生异常时,方案 4 均能较好地对其实现自适应调整。

为了进一步分析不同方案的预报精度,对四种方案得到的星钟参数进行未来两天的钟差预报,并与实际钟差观测值进行比较。计算得到四种方案的预报精度统计如表 3 所示,方案 2—方案 4 的预报钟差不符值如图 10 所示(因方案 1 预报结果失真,没有描述)。

表 3 不同方案的钟差预报精度统计

Tab. 3 Statistic predicted RMS of clock error at different schemes

	max	min	mean	RMS
方案 1	-3.443 58E-05	1.720 60E-05	-2.126 00E-05	2.241 42E-05
方案 2	5.741 07E-08	1.016 21E-08	3.011 22E-08	3.303 44E-08
方案 3	4.057 08E-08	-8.053 05E-10	1.399 33E-08	1.845 22E-08
方案 4	2.940 48E-08	-9.913 52E-10	9.682 56E-09	1.307 42E-08

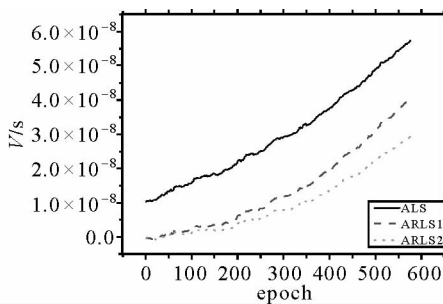


图 10 不同方案的预报钟差不符值

Fig. 10 Residual of precise clock error at different schemes

通过表 3 和图 10 可以看出,方案 1 预报精度较差,结果失真;而引入抗差估计的方案 3 和方案 4 预报精度明显优于没有进行抗差处理的方案 2;四种方案中,分类因子抗差自适应序贯平差(方案 4)预报精度最高,相比方案 2 和方案 3,其预报精度提高幅度分别为 60.4%和 29.2%。

5 结论与建议

(1) 通过对一维钟差序列设置不同窗口,能有效简便地实现钟差拟合模型的抗差自适应序贯平差。

(2) 抗差自适应序贯平差利用抗差等价权和自适应因子有效抑制了观测异常和状态扰动的影响,其钟差拟合预报精度明显优于标准序贯平差。

(3) 分类因子抗差自适应序贯平差通过对预报参数进行分类,利用不同的自适应因子分别控

制不同特征的状态异常,钟差拟合预报精度优于单因子抗差自适应序贯平差。

(4) 对于钟差窗口大小的最优设计,需要进一步的理论研究和数据测试,这也是作者下一步的研究重点。

本文算法同样适用于除二次多项式以外的其他钟差模型,如 AR 模型、灰色模型等。其开窗处理方案在导航定位算法中也可类似运用。

参考文献:

- [1] JI Shanbiao, ZHU Wenyao, XIONG Yongqiang. Calculation and Application of the GPS Satellite Clock Offset[J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 21(3): 42-48. (季善标, 朱文耀, 熊永清. 精密 GPS 卫星钟差的改正和应用[J]. 空间科学学报, 2001, 21(3): 42-48.)
- [2] JAMES P C, EVERETT R S, FRANK M. Improvement of the NIMA Precise Orbit and Clock Estimates[C]//ION GPS 1998. Nashville: ION, 1998.
- [3] GREG H, JACK T. Navigation Upload Performance[C]//ION GPS 2000. Salt Lake City: ION, 2000.
- [4] PAUL A K, DEMETRIOS M, MIHRAN M. Alternate Algorithms for Steering to Make GPS Time[C]//ION GPS 2000. Salt Lake City: ION, 2000.
- [5] LIU Li. Relativistic Theory of Time Transfer and Techniques of Clock Synchronization[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006. (刘利. 相对论时间比对理论与高精度时间同步技术[D]. 郑州: 信息工程大学, 2004.)
- [6] ZHENG Zuoya, CHEN Yongqi, LU Xiushan. An Improved Grey Model for the Prediction of Real-time GPS Satellite

- Clock Bias[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2008, 49(3): 306-320. (郑作亚, 陈永奇, 卢秀山. 灰色模型修正及其在实时 GPS 卫星钟差预报中的应用研究[J]. *天文学报*, 2008, 49(3): 306-320.)
- [7] GUO Hairong. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006. (郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.)
- [8] ZHOU Jiangwen. Classical Theory of Errors and Robust Estimation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1989, 18(2): 115-120. (周江文. 经典误差理论与抗差估计[J]. *测绘学报*, 1989, 18(2): 115-120.)
- [9] OU Jikun. Design of a New Scheme of Robust Estimation by Three Steps[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(3): 173-179. (欧吉坤. 一种三步抗差方案的设计[J]. *测绘学报*, 1996, 25(3): 173-179.)
- [10] YANG Yuanxi. Adaptively Robust Least Squares Estimation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(3): 206-211. (杨元喜. 自适应抗差最小二乘估计[J]. *测绘学报*, 1996, 25(3): 206-211.)
- [11] Editors of Surveying Adjustment in Wuhn University. Foundation of Surveying Adjustment [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003. (武汉大学测量平差编写组. 测量平差基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003.)
- [12] HE Haibo, YANG Yuanxi. Robust Estimation for Sequential Adjustment[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 1998, 7(1): 36-40. (何海波, 杨元喜. 序贯平差抗差估计[J]. *测绘工程*, 1998, 7(1): 36-40.)
- [13] WU Shengwu. Auto-adaptive Sequential Robust Estimation [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2006(1): 1-4. (吴生武. 自适应序贯抗差估计[J]. *测绘通报*, 2006(1): 1-4.)
- [14] CUI Xianqiang, YANG Yuanxi. Adaptively Robust Filtering with Classified Adaptive Factors[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(4): 490-494. (崔先强, 杨元喜. 分类因子自适应抗差滤波[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(4): 490-494.)
- [15] YANG Yuanxi, HE Haibo, XU Tianhe. Adaptive Robust Filtering for Kinematic GPS Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 293-298. (杨元喜, 何海波, 徐天河. 论动态自适应滤波[J]. *测绘学报*, 2001, 30(4): 293-298.)
- [16] YANG Yuanxi. Properties of Adaptive Robust Filtering for Kinematic GPS Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(3): 189-192. (杨元喜. 动态定位自适应滤波解的性质[J]. *测绘学报*, 2003, 32(3): 189-192.)
- [17] YANG Yuanxi. Adaptive Navigation and Kinematic Positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006. (杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.)
- [18] YANG Yuanxi, Cui Xianqiang. Adaptively Robust Filter with Multi Adaptive Factors[J]. *Survey Review*, 2008, 40(309): 260-270.
- [19] YANG Yuanxi, SONG Lijie, XU Tianhe. Robust Estimator for Correlated Observations Based on Bifactor Equivalent Weights [J]. *Journal of Geodesy*, 2002, 76(6-7): 353-358.
- [20] YANG Yuanxi, SONG Lijie, XU Tianhe. Robust Parameter Estimation for Geodetic Correlated Observation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 95-99. (杨元喜, 宋力杰, 徐天河. 大地测量相关观测抗差估计理论[J]. *测绘学报*, 2002, 31(2): 95-99.)
- [21] YANG Yuanxi, GAO Weiguang. Influence Comparison of Adaptive Factors on Navigation Results[J]. *Journal of Navigation*, 2005, 58(3): 471-478.
- [22] GUO Hairong, YANG Yuanxi. Analyses of Main Error Sources on Time-domain Frequency Stability for Atomic Clocks of Navigation Satellites [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 218-221. (郭海荣, 杨元喜. 导航卫星原子钟时域频率稳定性影响因素分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(2): 218-221.)
- [23] DEFRAIGNE P, BRUYNINX C. On the Link between GPS Pseudorange Noise and Day-boundary Discontinuities in Geodetic Time Transfer Solutions[J]. *GPS Solution*, 2007, 11: 239-249.
- [24] DACH R, HUGENTOBLE U, SCHILDKNECHT T, et al. Precise Continuous Time and Frequency Transfer Using GPS Carrier Phase[C]// *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. Vancouver: IEEE, 2005: 329-336.
- [25] GUYENNON N, CERRETTO G, TAVELLA P, et al. Further Characterization of the Time Transfer Capabilities of Precise Point Positioning (PPP): The Sliding Batch Procedure[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2009, 56(8): 1634-1641.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2009-10-20

修回日期: 2010-05-11

第一作者简介: 黄观文(1983—), 男, 博士生, 研究方向为 GNSS 精密钟差和导航定位。

First author: HUANG Guanwen (1983—), male, PhD candidate, majors in GNSS precise clock errors and precise positioning.

E-mail: huang830928@yahoo.com.cn