

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905250

一种高精度导航卫星钟差中长期预报方法

于 焯^{1,2}, 黄 默^{1,3}, 杨 斌^{1,2}, 胡 锐¹, 张飞燕⁴

(1. 中国科学院微电子研究所 北京 100029; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中国科学院大学微电子学院 北京 100049; 4. 郑州轻工业大学计算机与通信工程学院 郑州 450001)

摘要:为了提高卫星钟差中长期预报的精度,提出了一种基于冯德拉克滤波一次差的修正指数曲线法模型的卫星钟差中长期预报方法。该方法首先在建模之前考虑到卫星钟差钟跳和粗差频繁的现象,采用中位数法探测钟跳和粗差数据并将其剔除后,采用拉格朗日插值法将缺失的钟差数据补齐;其次,考虑到卫星钟差数据存在系统误差和随机误差,采用冯德拉克滤波平滑法对钟差数据进行平滑处理;然后,考虑到卫星钟差的有效数字位数较多,会降低模型的预报性能,采用一次差处理消除钟差序列趋势项的影响后,建立了修正指数曲线法预报模型;最后,采用IGS服务器上发布的事后精密卫星钟差产品,并结合2种典型变化趋势的卫星钟差进行了未来4个时间段的中长期预报实验。实验结果表明,该方法的中长期预报性能明显优于常用的二次多项式模型和灰色模型,其60 d的平均预报精度(RMS)相对于常用的二次多项式模型和灰色模型分别提高了92.00%和80.80%,平均预报稳定度(Range)相对于常用的二次多项式模型和灰色模型分别提高了92.40%和81.40%。

关键词:卫星钟差预报;系统误差;随机误差;冯德拉克滤波平滑;修正指数曲线法

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

A high-precision medium-long term prediction method for navigation satellite clock bias

Yu Ye^{1,2}, Huang Mo^{1,3}, Yang Bin^{1,2}, Hu Rui¹, Zhang Feiyan⁴

(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To improve the accuracy of medium-long term prediction of satellite clock bias (SCB), a prediction method based on Vondrak filter first-order differential modified exponential curve model (VD-MECM) is proposed. First, the frequent hopping and gross errors phenomenon of SCB before modeling are considered. The median absolute deviation is used to detect and eliminate the clock hopping and gross errors data. Meanwhile, the missing clock data can be recovered by using the Lagrange interpolation method. Secondly, the systematic and random errors of SCB are studied. Vondrak filter smoothing algorithm is used to reduce these errors. Thirdly, the prediction performance of the model is improved by considering effective data bits in SCB. The first-order difference is used to eliminate the influence of the trend item of the clock bias sequence. And, MECM prediction model is formulated. Finally, the medium-long term forecast experiments for the next four time periods are implemented based on the post-accuracy precision SCB published in the IGS server. Two typical changing trends are also considered. Experimental results show that the medium-long term prediction accuracy of this method is better than the quadratic polynomial model (QPM) and the gray model (GM(1, 1)). Compared with these two methods, the average prediction accuracy (RMS) of 60-day is increased by 92.00% and 80.80%, and the average prediction stability (Range) of 60-day is increased by 92.40% and 81.40%.

Keywords: satellite clock bias prediction; systematic error; random error; Vondrak filter smoothing method; modified exponential curve method

0 引 言

卫星钟差预报是全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)应用中至关重要的问题之一^[1-2]。目前,国际 IGS(international GNSS service)数据分析中心发布的事后精密卫星钟差产品的精度小于 0.1 ns,可以实现厘米级的精密单点定位(precise point positioning, PPP)的需求,但是该产品需要在 13 d 之后才能获取,不能满足用户对实时性的需求。其次,在卫星自主导航中,需要地面站上传长期(GPS 需要预报 210 d)的星历和钟差作为先验信息,以在地面站被摧毁的情况下,导航卫星能够利用这些先验信息进行自主导航^[3-4],所以如何提高卫星钟差预报的精度和稳定度一直都是国内外研究的热点问题之一。

目前,许多学者在卫星钟差预报方面开展了多角度、多方位的研究,并取得了一系列重要成果。其中,常用的卫星钟差预报模型主要有:QPM 模型(QPM)、二次多项式加周期项模型(QPPTM)、灰色模型(GM(1,1))、卡尔曼滤波模型(KF)、混沌时间序列模型、求和自回归滑动平均模型(ARIMA)、支持向量机模型(SVM)、小波神经网络模型(WNN)等^[5-12]。这些模型分别适用于不同条件下导航卫星钟差的短期、中长期和长期预报,但也均有各自的适用范围和局限性。如:QPM 模型较适用于卫星钟差的短期预报,但是其模型是时间的函数,误差会随时间的累计而迅速增大。灰色系统模型需要数据平滑且呈指数变化。支持向量机对非线性、高维数、小样本预报较好,但是对于非线性特性的钟差预报效果不好等缺点。

本文提出了一种基于冯德拉克滤波一次差的修正指数曲线法模型的卫星钟差中长期预报方法。该方法考虑了卫星钟差数据存在系统误差和随机误差的特点,采用冯德拉克滤波对钟差数据进行平滑处理,再者考虑到卫星钟差的有效数字位数较多的特点,会降低模型的预报性能,采用一次差处理消除钟差序列趋势项的影响后,建立了修正指数曲线法预报模型,并结合 2 种典型变化趋势的卫星钟差序列,采用 IGS 服务器上发布的事后精密卫星钟差产品作为实验数据,进行了中长期预报实验,其中长期预报的精度和稳定度明显优于常用的 QPM 模型和灰色模型。

1 星载原子钟的物理特性

原子钟的输出量^[13]可以表示为如下:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \cdot \sin[2\pi f_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中: V_0 为标称增幅; f_0 为标称频率; $\varepsilon(t)$ 为振幅的起

伏; $\varphi(t)$ 为相位偏差。原子钟信号的瞬时相位为: $\phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t)$, 而瞬时角频率是相位的时间导数,即 $\frac{d\phi(t)}{dt} =$

$2\pi f(t) = 2\pi f_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt}$ 。于是,可得瞬时频率为:

$$f(t) = f_0 + \frac{d\varphi(t)}{2\pi dt} \quad (2)$$

式中: $\frac{d\varphi(t)}{dt}$ 为瞬时频率偏差。

相对相位偏差 $x(t)$ 和相对频率偏差 $y(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi f_0} \\ y(t) = f_0 + \frac{d\varphi(t)}{2\pi f_0 dt} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \cdot \sin[2\pi f_0(t + x(t))] \quad (4)$$

式中: $x(t)$ 为原子钟的钟差。

综上可知,星载原子钟的钟差模型可以表示为:

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} a t^2 + \psi(t) \quad (5)$$

式中: $x_0 = x(0)$ 代表初始时刻的相位偏差; $y_0 = y(0)$ 代表初始时刻的频率偏差; a 代表频率偏差 $y(t)$ 的线性波动,即频率漂移率; $\psi(t)$ 代表观测误差。由钟差模型式(5)可知,卫星钟差中包括系统误差和随机误差。

2 导航卫星钟差预报模型

2.1 钟差数据异常探测

由于卫星钟差钟跳频繁,所以对卫星钟差数据的质量检测就显得非常重要。本文采用具有较好抗差性和时效性的中位数法(median absolute deviation, MAD)进行粗差和钟跳探测^[14],其表达式为:

$$MAD = Median\left\{\frac{|y_i - m|}{0.6745}\right\} \quad (6)$$

式中: m 为卫星钟差频率数据的中间数,即 $m = Median(y_i)$ 。

当卫星钟差的观测频率数据 $y_i > (m + n \cdot MAD)$ 或者 $y_i < (m - n \cdot MAD)$ 时(整数 n 根据需要确定),可以判断其为异常点。一般经验认为 1 h 内钟跳或者粗差最多发生一次,故可以根据异常点是否连续来判断其为钟跳点或者粗差点。探测到钟跳点或者粗差点后将其剔除,然后采用拉格朗日插值法把缺失的数据补齐。

2.2 卫星钟差数据预处理

1) 冯德拉克滤波

由于卫星钟差数据中系统误差和随机误差对预报精度的影响,为了获得高精度的时间信息,所以在建立卫星

钟差预报模型之前,首先采用冯德拉克滤波对星载原子钟的钟差数据进行平滑处理,以得到一组噪声减小的平滑钟差数据序列。

对于长度为 n 的原始观测钟差时间序列: $\{x(i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 。冯德拉克滤波的基本原理^[15]可表示为如下的一个优化问题:

$$\min F = U + \zeta^2 V$$

$$\begin{cases} U = \sum_{i=1}^n q_i [x'(i) - x(i)]^2 \\ V = \sum_{i=1}^{n-3} [\Delta^3 x'(i)]^2 \\ \eta = \frac{1}{\zeta^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x'(i)$ 为滤波后的钟差时间序列; q_i 为原始观测钟差时间序列的权重; η 为冯德拉克滤波因子; U 为冯德拉克滤波的拟合度; V 反应了待求的滤波钟差时间序列的总体滤波程度。

在使用冯德拉克滤波时,选取合适的滤波因子 η 对卫星钟差的预报结果有着很大的影响。本文采用交叉验证法^[16]去动态自适应地寻求最佳的滤波因子 η ,其步骤如下:

(1) 将长度为 n 的原始观测钟差时间序列 $\{x(i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 随机划分为两段,第一段称为原始观测钟差时间序列的平滑样本数据序列 $\{x_1(i), i = 1, 2, 3, \dots, N_1\}$,它的样本容量为 N_1 ,余下的部分称为原始观测钟差时间序列的证认样本数据序列 $\{x_2(i), i = 1, 2, 3, \dots, N_2\}$,它的样本容量为 N_2 ,与之对应的时刻为 $\{t_2(i), i = 1, 2, 3, \dots, N_2\}$ 且 $N_1 + N_2 = n$ 。

(2) 取定某个滤波因子 η ,对原始观测钟差时间序列的平滑样本数据序列 $\{x_1(i), i = 1, 2, 3, \dots, N_1\}$ 进行平滑处理,求得对应的平滑值 \hat{f} ,然后计算与该滤波因子所对应的证认样本数据序列 $\{x_2(i), i = 1, 2, 3, \dots, N_2\}$ 的方差:

$$D(\eta, q) = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} \{x_2(i) - \hat{f}[t_2(i)]\}^2 \quad (8)$$

式中: q 为原始观测钟差时间序列的某种随机划分, $\hat{f}[t_2(i)]$ 是平滑值 \hat{f} 对 $\{t_2(i), i = 1, 2, 3, \dots, N_2\}$ 的内插或者外推。

(3) 重复以上的步骤,对于每一个滤波因子 η 可以求得原始观测钟差时间序列 $\{x(i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 的 M 次随机划分的证认样本数据序列的平均方差为:

$$\bar{D}(\eta, q) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M D(\eta, q_i) \quad (9)$$

比较不同的滤波因子 η 所对应的平均方差 $\bar{D}(\eta, q)$,选取使 $\bar{D}(\eta, q)$ 最小的那个滤波因子作为最佳的冯德拉克滤波平滑因子。

2) 一次差处理

经冯德拉克滤波平滑处理后的原始卫星钟差时间序列的有效数字位数较多,如果将其直接作为建模的输入会降低模型的预报性能。鉴于此,先对冯德拉克滤波平滑处理后的钟差时间序列的相邻历元作一次差处理,然后,基于一次差的钟差时间序列建立预报模型预报一次差的值,最后再将预报的一次差数据序列还原,即可得到卫星钟差的最终预报值^[17]。事实上,卫星钟差相邻历元的钟差数据在数值上相差并不大,通过一次差处理可以在一定程度上消除钟差序列趋势项的影响,从而得到一组有效数字位数减小的数据序列,更有利于修正指数曲线法模型的建立。此外,一次差处理还可以消除钟差数据中部分系统误差的影响,从而,提高修正指数曲线法模型的预报性能。

2.3 钟差一次差序列预报

对于经中位数法异常探测剔除钟跳和粗差数据后,采用拉格朗日插值法补齐的长度为 n 的钟差时间序列:

$$\mathbf{Y}^{(0)} = \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(n)\} \quad (10)$$

对以上钟差序列采用冯德拉克滤波平滑处理后,得到一组噪声减小的新的钟差时间序列:

$$\mathbf{Y}^{(1)} = \{y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n)\} \quad (11)$$

然后,对于以上长度为 n 的钟差时间序列 $\mathbf{Y}^{(1)} = \{y^{(1)}(i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 的相邻历元间作一次差处理,得到一组有效数字位数和系统误差减小的钟差差值数据序列:

$$\Delta \mathbf{Y}^{(2)} = \{\Delta y^{(2)}(1), \Delta y^{(2)}(2), \dots, \Delta y^{(2)}(n-1)\} \quad (12)$$

式中: $\Delta y^{(2)}(i) = y^{(1)}(i+1) - y^{(1)}(i), i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ 。

对于以上长度为 $n-1$ 的钟差一次差序列 $\Delta \mathbf{Y}^{(2)} = \{\Delta y^{(2)}(i), i = 1, 2, 3, \dots, n-1\}$,建立修正指数曲线法预报模型为:

$$\Delta y^{(2)}(t) = K + \alpha \cdot \beta^t \quad (13)$$

式中:这3个参数 K, α 和 β 的确定均需要使用历史钟差数据。

当 K 值可预先确定时,可采用“最小二乘法”来估计模型中的参数 K, α 和 β ,而当 K 值不能预先确定时,可采用“三和法”来估计模型中的参数 K, α 和 β 。显然,这里的 K 值是不能预先确定的,所以使用“三和法”来估计模型中的参数 K, α 和 β 。“三和法”参数估计的步骤如下:

把上述的 $n-1$ 个钟差差值数据序列等分为三等分,每个部分有 m 个,即 $n-1 = 3m$ 。

$$\begin{cases} \Delta y^{(2)}(t) | t = 1, 2, 3, \dots, m \\ \Delta y^{(2)}(t) | t = m+1, m+2, \dots, 2m \\ \Delta y^{(2)}(t) | t = 2m+1, 2m+2, \dots, 3m \end{cases} \quad (14)$$

令式(14)中的每个部分的和等于相应的观测值

之和。

$$\begin{cases} \Sigma_1 = \sum_{t=1}^m \Delta y^{(2)}(t) \\ \Sigma_2 = \sum_{t=m+1}^{2m} \Delta y^{(2)}(t) \\ \Sigma_3 = \sum_{t=2m+1}^{3m} \Delta y^{(2)}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 表示钟差时间序列观测值的各部分之和, 且

$$\begin{cases} \Sigma_1 = \sum_{t=1}^m \Delta \hat{y}^{(2)}(t) = \sum_{t=1}^m (K + \alpha \beta^t) = \\ \quad mK + \alpha \beta \cdot (1 + \beta + \beta^2 + \dots + \beta^{m-1}) \\ \Sigma_2 = \sum_{t=m+1}^{2m} \Delta \hat{y}^{(2)}(t) = \sum_{t=m+1}^{2m} (K + \alpha \beta^t) = \\ \quad mK + \alpha \beta^{m+1} \cdot (1 + \beta + \beta^2 + \dots + \beta^{m-1}) \\ \Sigma_3 = \sum_{t=2m+1}^{3m} \Delta \hat{y}^{(2)}(t) = \sum_{t=2m+1}^{3m} (K + \alpha \beta^t) = \\ \quad mK + \alpha \beta^{2m+1} \cdot (1 + \beta + \beta^2 + \dots + \beta^{m-1}) \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16)可以计算得到:

$$\begin{aligned} \hat{\beta} &= \left(\frac{\Sigma_3 - \Sigma_2}{\Sigma_2 - \Sigma_1} \right)^{\frac{1}{m}} = \\ &= \left(\frac{\sum_{t=2m+1}^{3m} \Delta y^{(2)}(t) - \sum_{t=m+1}^{2m} \Delta y^{(2)}(t)}{\sum_{t=m+1}^{2m} \Delta y^{(2)}(t) - \sum_{t=1}^m \Delta y^{(2)}(t)} \right)^{\frac{1}{m}} \\ \hat{\alpha} &= (\Sigma_2 - \Sigma_1) \cdot \frac{\beta - 1}{\beta \cdot (\beta^m - 1)^2} = \\ &= \left(\sum_{t=m+1}^{2m} \Delta y^{(2)}(t) - \sum_{t=1}^m \Delta y^{(2)}(t) \right) \cdot \frac{\beta - 1}{\beta \cdot (\beta^m - 1)^2} \\ \hat{K} &= \frac{1}{m} \cdot \left[\Sigma_1 - \frac{\alpha \beta \cdot (\beta^m - 1)}{\beta - 1} \right] = \\ &= \frac{1}{m} \cdot \left[\sum_{t=1}^m \Delta y^{(2)}(t) - \frac{\alpha \beta \cdot (\beta^m - 1)}{\beta - 1} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

根据式(17)可估计出 K, α 和 β 的估计值 $\hat{K}, \hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$, 然后代入式(13)中, 即可得到预报模型为:

$$\Delta \hat{y}^{(2)}(t) = \hat{K} + \hat{\alpha} \cdot \hat{\beta}^t \quad (18)$$

利用模型(18)即可预报出未来任意时刻一次差的钟差数据序列。最后, 将一次差预报序列和相应的钟差值对应叠加即可得到所求钟差的最终预报值。

对于预报钟差长度为 t_0, t_1, \dots, t_n 的序列, 可得钟差预报的最终表达式为:

$$\hat{y}^{(0)}(n+j) = y^{(0)}(n) + \sum_{i=1}^j \Delta \hat{y}^{(2)}(n-1+i), \quad m, j \in N^+ \quad (19)$$

由式(13)可得, 它的一次差为:

$$\begin{aligned} \Delta^2 y^{(2)}(t) &= \Delta y^{(2)}(t+1) - \Delta y^{(2)}(t) = \\ &= K + \alpha \cdot \beta^{t+1} - (K + \alpha \cdot \beta^t) = \\ &= \alpha \cdot \beta^t (\beta - 1) \end{aligned} \quad (20)$$

根据式(20)可以计算它的一次差的一阶比值为:

$$\frac{\Delta^2 y^{(2)}(t+1)}{\Delta^2 y^{(2)}(t)} = \frac{\alpha \cdot \beta^{t+1} (\beta - 1)}{\alpha \cdot \beta^t (\beta - 1)} = \beta \quad (21)$$

由式(21)可知, 修正指数曲线法模型的数据特征需要满足其一次差的一阶比值为一个常数。虽然实际建模数据不可能完全满足一次差的一阶比值为一个常数, 但是根据这一特点, 只要实际建模钟差差值数据序列一次差的比值近似为某一常数时, 就可以尝试使用修正指数曲线法模型来进行预报。事实上, 卫星钟差的相邻历元在数值上相差并不大, 采用冯德拉克滤波处理后相邻历元的数值得到进一步减小。对于呈单调变化的钟差序列, 对其一次差数据序列建立修正指数曲线法模型, 即可得到比较满意的预报效果。

3 导航卫星钟差预报

3.1 实验数据来源

为了验证本文预报方法的有效性, 采用 IGS 服务器上 (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov>) 发布的 GPS 2 000 周第 0 天到 2 008 周第 3 天共 60 d, 间隔时长为 15 min 的事后精密卫星钟差数据进行仿真分析。在该时间段内在轨的 GPS 卫星有 30 多颗, 其星载钟有以下 4 种类型: BLOCK IIR-Rb 钟、BLOCK IIR-M-Rb 钟、BLOCK IIF-Rb 钟和 BLOCK IIF-Cs 钟。由于北斗系统的星载钟与 GPS 基本一致, 且北斗二代系统均搭载的为铷原子钟, 为使研究结果能为我国北斗系统在钟差预报方面提供一些参考, 所以选取了 GPS IIR-Rb PRN02、GPS IIF-Rb PRN06 和 GPS IIR-M-Rb PRN17 号 3 颗卫星的钟差数据进行预报实验。截止 2019 年 4 月 16 日, 它们的相关信息见表 1。

表 1 选择的卫星相关信息

Table 1 Selected satellite related information

卫星号	钟类型	发射时间	开始运行时间
PRN02	IIR-Rb	2004. 11. 6	2004. 11. 22
PRN06	IIF-Rb	2014. 5. 17	2014. 6. 10
PRN17	IIR-M-Rb	2005. 9. 26	2005. 11. 13

这 3 颗卫星第 2 000 周第 0 天到 2008 周第 3 天, 共 60 d 的精密钟差时间序列的变化情况如图 1 所示, 其中 PRN02、PRN06 号卫星的钟差时间序列呈单调递减趋势, PRN17 号卫星的钟差时间序列呈单调递增趋势, 具有充分的代表性。

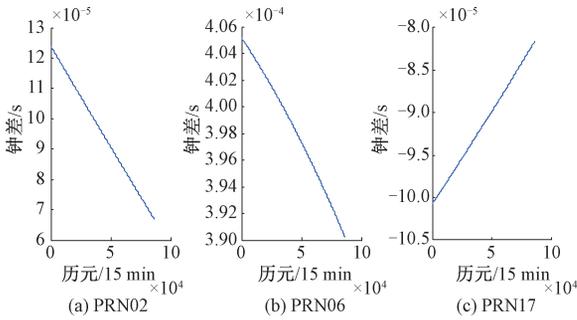


图1 PRN02、PRN06和PRN17号卫星60 d的精密钟差
Fig.1 60-day precision satellite clock bias for PRN02, PRN06 and PRN17

由于卫星钟差数据的有效位数比较多且数值较大,使得原始钟差数据容易掩盖数据异常点,而异常数据点在其对应的一次差序列中表现为峰值点,从而使得异常钟差数据更容易探测。这3颗卫星的钟差一次差值变化情况如图2所示,从图中可以看出它们均含有异常的钟差数据,所以在建模预报之前首先要探测异常钟差数据并将它们剔除,然后采用拉格朗日插值法把缺失的数据补齐。

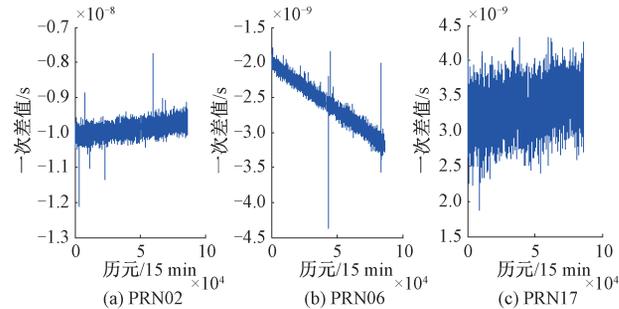


图2 PRN02、PRN06和PRN17号卫星60 d的精密钟差一次差

Fig.2 Single difference of 60-day precision satellite clock bias for PRN02, PRN06 and PRN17

3.2 预报结果与分析

为了充分分析本文方法的中长期预报性能,分别建立二次多项式模型(QPM)、灰色模型(GM(1,1))和基于冯德拉克滤波一次差的修正指数曲线法(VD-MECM)模型,去预报1~7 d、1~14 d、1~30 d和1~60 d的钟差数据,并将预报的结果同QPM模型和GM(1,1)模型的预报结果进行比较。预报结果的精度通过与IGS服务器上发布的精密钟差作差后得到,其量化标准使用均方根误差RMS(计算公式见式(22))和最大误差与最小误差之差的绝对值,即极差Range(计算公式见式(23))作为评价预报结果的统计量,去比较分析

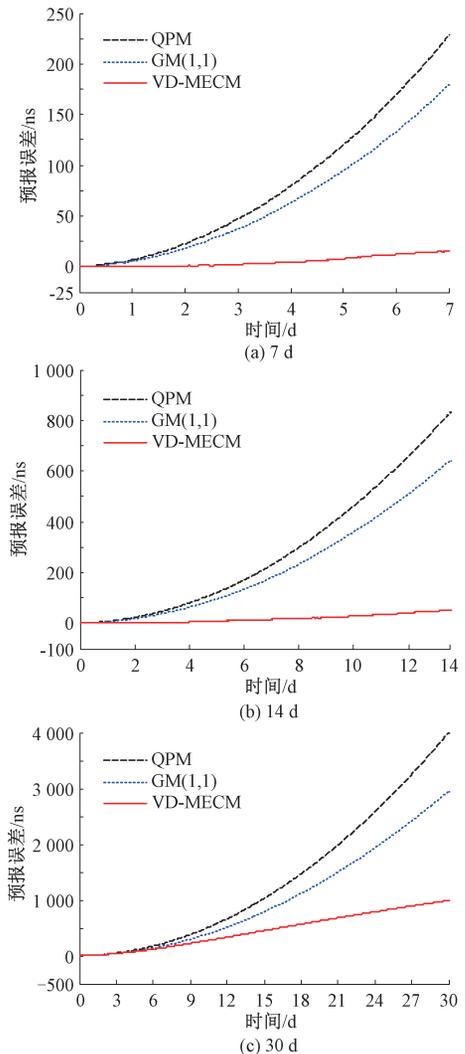
QPM、GM(1,1)和VD-MECM模型的预报精度及其稳定度。其中RMS表征了预报结果的精度,Range表征了算法的稳定度。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (error^{(i)})^2}{n}} \quad (22)$$

$$Range = |error_{\max}^{(i)} - error_{\min}^{(i)}| \quad (23)$$

式中: $error^{(i)} = \hat{x}_i - x_i$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 为各模型的预报误差, \hat{x}_i 为第 i 时刻各模型预报的卫星钟差, x_i 为第 i 时刻IGS服务器上发布的事后精密卫星钟差, n 为观测历元的个数; $error_{\max}^{(i)}$ 、 $error_{\min}^{(i)}$ 分别表示各模型预报误差中的最大误差和最小误差。

限于篇幅,本文仅给出了PRN02号卫星的钟差预报对比情况,PRN06、PRN17号卫星钟差的预报对比情况与之类似,将不再给出。具体如图3~4和表2所示。



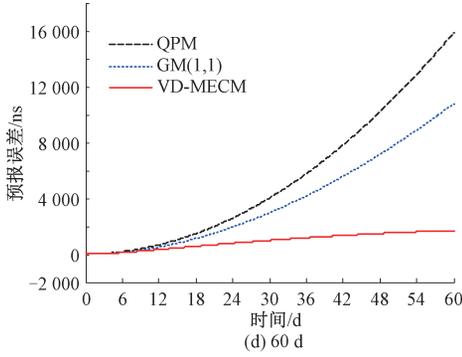
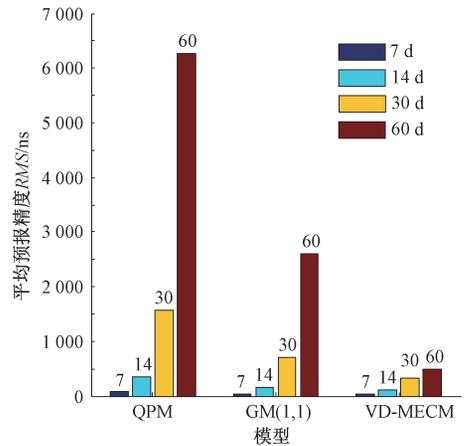


图 3 PRN02 号卫星钟差的预报误差

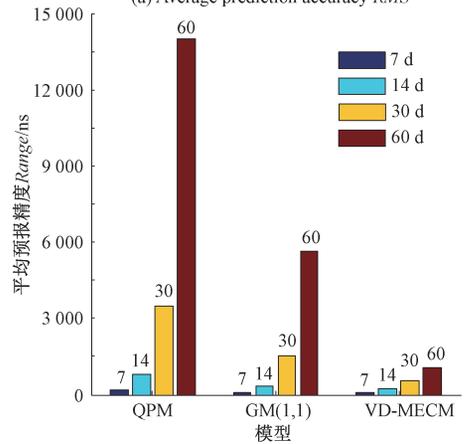
Fig.3 Prediction error of satellite clock bias of PRN02

由图 3~4 和表 2 可知：

1) 在卫星钟差的中期(1~7 d 和 1~14 d)预报中, QPM、GM(1,1)模型的平均预报精度分别为 91.33、351.86 ns 和 41.83、158.11 ns,而本文方法的平均预报精度分别为 35.36 ns 和 107.39 ns,相比于 QPM 模型的平均预报精度分别提高了 61.30% 和 69.50%,相比于 GM(1,1)模型的平均预报精度分别提高了 15.50% 和 32.10%。QPM、GM(1,1)模型的平均预报稳定度分别为 200.96、777.05 ns 和 91.63、351.87 ns,而本文方法的平均预报稳定度分别为 71.85 ns 和 222.63 ns,相比于 QPM 预报模型的平均预报稳定度分别提高了 64.20% 和 71.30%,相比于 GM(1,1)模型的平均预报稳定度分别提高了 21.60% 和 36.70%。



(a) 平均预报精度RMS
(a) Average prediction accuracy RMS



(b) 平均预报精度Range
(b) Average prediction accuracy Range

图 4 平均预报精度 RMS、Range 统计对比
Fig.4 Average prediction accuracy RMS, Range statistical comparison

表 2 卫星钟差预报误差统计

Table 2 Satellite clock bias prediction error statistics

(ns)

预报 天数	方法	PRN02		PRN06		PRN17		平均值	
		RMS	Range	RMS	Range	RMS	Range	RMS	Range
7	QPM	103.87	228.14	98.79	217.31	71.32	157.42	91.33	200.96
	GM(1,1)	81.69	178.92	26.38	57.70	17.42	38.28	41.83	91.63
	VD-MECM	72.19	147.72	20.47	42.60	13.41	25.23	35.36	71.85
14	QPM	400.88	888.59	383.35	852.41	271.35	590.14	351.86	777.05
	GM(1,1)	310.74	684.45	96.28	210.22	67.31	160.94	158.11	351.87
	VD-MECM	208.51	408.86	92.67	201.27	21.00	57.76	107.39	222.63
30	QPM	1 796.13	3 996.17	1 734.36	3 867.06	1 185.65	2 651.46	1 572.05	3 504.90
	GM(1,1)	1 341.46	2 942.64	417.15	922.62	329.52	720.69	696.04	1 528.65
	VD-MECM	550.57	989.98	268.85	365.41	135.76	294.75	318.39	550.05
60	QPM	7 100.73	15 832.60	6 891.16	15 386.15	4 785.31	10 706.19	6 259.07	13 974.98
	GM(1,1)	4 955.09	10 746.91	1 626.23	3 616.61	1 194.60	2 620.74	2 591.97	5 661.42
	VD-MECM	1 066.90	1 693.90	311.70	1 173.75	117.05	298.03	498.55	1 055.23

2)在卫星钟差的中长期(1~30 d和1~60 d)预报中,QPM、GM(1,1)模型的平均预报精度分别为1 572.05、6 259.07 ns和696.04、2 591.97 ns,而本文方法的平均预报精度分别为318.39 ns和498.55 ns,相比于QPM模型的平均预报精度分别提高了79.70%和92.00%,相比于GM(1,1)模型的平均预报精度分别提高了54.30%和80.80%。QPM、GM(1,1)模型的平均预报稳定度分别为3 504.90、13 974.98 ns和1 528.65、5 661.42 ns,而本文方法的平均预报稳定度分别为550.05 ns和1 055.23 ns,相比于QPM模型的平均预报稳定度分别提高了84.30%和92.40%,相比于GM(1,1)模型的平均预报稳定度分别提高了64.00%和81.40%。

3)在卫星钟差预报中,无论是中期还是中长期预报,本文方法的平均预报精度和稳定度均明显优于QPM和GM(1,1)模型的平均预报精度和稳定度,尤其是对于1~30 d和1~60 d的中长期预报的平均预报精度和稳定度改善比较大。其次是,GM(1,1)预报模型的平均预报精度和稳定度优于QPM预报模型的平均预报精度和稳定度,这进一步说明了GM(1,1)预报模型的中长期预报性能要优于QPM预报模型的中长期预报性能。

4 结 论

为了提高卫星钟差预报的精度和稳定度,本文提出了一种基于冯德拉克滤波一次差的修正指数曲线法的卫星钟差中长期预报方法。首先,在建模之前,考虑到卫星钟差数据钟跳和粗差频繁的现象,采用中位数法探测钟跳和粗差并将其剔除后,采用拉格朗日插值法将缺失的数据补齐;然后,考虑到卫星钟差数据存在系统误差和随机误差,采用冯德拉克滤波对钟差数据进行平滑处理,同时,考虑到卫星钟差的有效数字位数较多,会降低模型的预报性能,采用一次差处理可以在一定程度上消除钟差序列趋势项的影响,从而得到一组有效数字位数减少的数据序列,更有利于修正指数曲线法模型的建立。最后,结合2种典型变化趋势的卫星钟差序列进行了未来4个时间段的中期和长期预报实验,实验结果验证了该方法对卫星钟差中长期预报的优越性和稳定性,其预报效果明显优于常用的QPM模型和GM(1,1)模型,为卫星钟差的中长期预报提供了新的思路。但是该方法仍然没有克服误差累积的现象,所以还有待进一步研究如何实现卫星钟差高精度的中长期预报。

参考文献

[1] 于焯,张慧君,李孝辉.含误差预报校正的GM(1,1)卫星钟差预报新方法[J].测绘科学,2019,44(4):8-14.
YU Y, ZHANG H J, LI X H. A new method of GM(1,1) satellite clock bias prediction with error prediction

correction [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(4):8-14.

- [2] 滕云龙,师奕兵,郭承军.基于灰色理论的钟差预测模型辅助RAIM算法研究[J].电子测量与仪器学报,2010,24(3):257-262.
TENG Y L, SHI Y B, GUO CH J. Research on RAIM augmented with clock bias prediction model based on grey theory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2010, 24(3):257-262.
- [3] 陈演羽,李廷会,黄飞江,等.基于混沌时间序列的GPS卫星钟差预测算法[J].仪器仪表学报,2018,39(4):115-122.
CHEN Y Y, LI T H, HUANG F J, et al. GPS satellite clock bias prediction algorithm based on chaotic time series [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4):115-122.
- [4] 李成龙,陈西宏,刘继业,等.利用自适应TS-IPSO优化的灰色系统预报卫星钟差[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(6):854-859.
LI CH L, CHEN X H, LIU J Y, et al. Predicting satellite clock errors using grey model optimized by adaptive TS-IPSOHU [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition), 2018, 43(6):854-859.
- [5] 张杰,周渭,宣宗强,等.卫星钟差预报模型中周期项的选取方法及性能分析[J].天文学报,2013,54(3):282-290.
ZHANG J, ZHOU W, XUAN Z Q, et al. Selection of periodic items and its performance in the forecasting model of satellite clock bias [J]. Acta Astronomica Sinica, 2013, 54(3):282-290.
- [6] 王利,张勤,黄观文,等.基于指数平滑法的GPS卫星钟差预报[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(7):995-1001.
WANG L, ZHANG Q, HUANG G W, et al. GPS satellite clock bias prediction based on exponential smoothing method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(7):995-1001.
- [7] 于焯,张慧君,李孝辉.基于一阶差分修正指数曲线法的GPS卫星钟差预报[J].探测与控制学报,2018,40(4):94-98.
YU Y, ZHANG H J, LI X H. GPS satellite clock bias prediction based on first-order difference MECM [J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(4):94-98.
- [8] LIU Q, CHEN X H, ZHANG Y SH, et al. A novel short-medium term satellite clock error prediction algorithm

- based on modified exponential smoothing method [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018,1-7.
- [9] 雷雨,赵丹宁,李变,等.基于小波变换和最小二乘支持向量机的卫星钟差预报[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2014,39(7):815-819.
- LEI Y, ZHAO D N, LI B, et al. Prediction of satellite clock bias based on wavelet transform and least squares support vector machines [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2014,39(7):815-819.
- [10] WANG Y, LU Z, QU Y, et al. Improving prediction performance of GPS satellite clock bias based on wavelet neural network [J]. *GPS Solutions*, 2016, 21(2):1-12.
- [11] 于焯,张慧君,李孝辉.组合模型在卫星钟差中长期预报中的应用和比较[J].*电子测量技术*,2017,40(11):7-11.
- YU Y, ZHANG H J, LI X H. Application and comparison of combined model for the middle and long-term prediction of the satellite clocks bias [J]. *Electronic measurement technology*, 2017, 40(11):7-11.
- [12] 徐君毅,曾安敏.ARIMA(0,2,q)模型在卫星钟差预报中的应用[J].*大地测量与地球动力学*,2009,29(5):116-120.
- ZHEN J Y, ZENG AN M. Application of ARIMA (0, 2, Q) model to prediction of satellite clock error [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(5):116-120.
- [13] 王颖,徐波,杨旭海.一种利用泛函网络进行导航卫星钟差预报的方法研究[J].*宇航学报*,2012,33(10):1401-1406.
- WANG Y, XU B, YANG X H. Research on the navigation satellite clock error prediction using functional network [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(10):1401-1406.
- [14] 蔡成林,何成文,韦照川.一种GPS IIR-M型卫星超快星历钟差预报的高精度修正方法[J].*测绘学报*,2016,45(7):782-788.
- CAI CH L, HE CH W, WEI ZH CH. A high-precision correction method of ultra-rapid ephemeris clock bias prediction for GPS block IIR-M satellites [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(7):782-788.
- [15] 于焯,张慧君,李孝辉,等.基于Vondrak滤波1阶差分灰色模型的卫星钟差预报方法[J].*天文学报*,2018,59(2):75-84.
- YU Y, ZHANG H J, LI X H, et al. Prediction method of satellite clock bias based on grey model of first-order difference of Vondrak filter [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2018,59(2):75-84.
- [16] 雷雨,赵丹宁.利用Vondrak平滑处理PPP时间传递的随机噪声[J].*测绘工程*,2013,22(6):18-21.
- LEI Y, ZHAO D N. Filtering random noise from PPP time transfer based on Vondrak [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2013, 22(6):18-21.
- [17] 雷雨,赵丹宁,蔡宏兵.利用结构自适应极端学习机预报导航卫星钟差[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2018,43(5):664-668,718.
- LEI Y, ZHAO D N, CAI H B. Prediction of navigation satellite clock offset by adaptive extreme learning machine [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5):664-668, 718.

作者简介



于焯(通信作者),2014年于陕西理工大学获得学士学位,现为中国科学院大学博士研究生,主要研究方向为卫星钟差预报、信号处理和精密导航定位技术。

E-mail: yuye115@mailsucas.edu.cn

Yu Ye (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Technology in 2014. He is currently a Ph. D. candidate at the University of Chinese Academy of Sciences. His main research interests include satellite clock bias prediction, signal processing and precision navigation positioning technology.



黄默,现为中国科学院微电子研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为高速数字信号处理、高速数据采集等。

E-mail: huangmo@ime.ac.cn

Huang Mo is a research fellow and Ph. D. supervisor at the Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include high-speed digital signal processing, high-speed data acquisition, etc.