

文章编号: 1001-1595(2010)02-0146-05

导航卫星原子钟 Kalman 滤波中噪声方差-协方差的确定

郭海荣^{1,2}, 杨元喜³, 何海波¹, 徐天河³

1. 北京市 5136 信箱, 北京 100094; 2. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 3. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

Determination of Covariance Matrix of Kalman Filter Used for Time Prediction of Atomic Clocks of Navigation Satellites

GUO Hairong^{1,2}, YANG Yuanxi³, HE Haibo¹, XU Tianhe³

1. P. O. Box 5136, Beijing 100094, China; 2. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 3. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: In order to manage the operational problems of satellite clocks using Kalman filter, its covariance matrices need to be determined. A Kalman filter equation for Rubidium clocks was presented at first. A method for estimating the process noises and the observation noises of Kalman filter using total Hadamard variance was deduced. And then the prediction covariance represented by a function of the Kalman Filter process noises and the observation covariance was constructed. The precision of prediction was analyzed using the 5-min precise clock data of GPS Block IIR rubidium clocks. The results show that: ① the prediction precision is 1 ns or so when prediction time is within one hour; ② the prediction precision is (8~9) ns when prediction time is within 6 hours. Then the correctness is further verified.

Key words: satellite navigation; atomic clock; Kalman filter; total Hadamard variance

摘要: 用 Kalman 滤波实时监测卫星钟运行状况, 需要确定 Kalman 滤波协方差阵。首先介绍适用于铷钟的 Kalman 滤波方程, 推导基于哈达玛总方差的 Kalman 滤波过程噪声参数和观测噪声估计方法, 并在此基础上构造 Kalman 滤波状态噪声协方差阵和观测噪声协方差阵。利用 GPS Block IIR 铷钟事后处理的采样间隔为 5 min 的精密钟差数据进行了预报分析, 结果表明, 当预报时间为 1 h 时, 预报精度在 1 ns 左右; 当预报时间为 6 h 时, 预报精度在 (8~9) ns 之间。进一步验证 Kalman 滤波协方差阵估计方法的正确性。

关键词: 卫星导航; 原子钟; Kalman 滤波; 哈达玛总方差

中图分类号: P228 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40474001, 40274002, 40604003)

1 引言

原子钟的时差、频差和频漂估计通常采用事后批处理技术, 如方差分析、频谱分析和极大似然估计等。不过, 事后处理技术存在一个问题: 不能实时监测卫星钟的运行状况, 且不能实时形成稳定的时间尺度, 为此国外许多学者研究了原子钟参数估计的 Kalman 滤波算法。研究成果可归结为两类: 在函数模型方面, Shmaliy 等根据 GPS 定时接收机驱动的铷钟和石英钟的定时模式, 比较分析 1 维滤波模型、2 维滤波模型和 3 维滤波模型^[1-2]; Su 等推导非线性频漂情况下的 Kalman 滤波方程^[3-4]; Stein 等给出原子钟参数实时估计的 Kalman 滤波算法, 其状态噪声协方差阵和观测噪声协方差阵采用噪声谱密度经验值^[5-6]。在

随机模型方面, Hutsell 等推导了基于哈达玛方差的 Kalman 滤波过程噪声参数计算公式, 并对在轨 GPS 铷钟进行状态参数预报分析^[7-9]; David 等研究原子钟受调频闪变噪声影响时的 Kalman 滤波算法^[10]; Greenhall 等研究基于原子钟组的 Kalman 滤波时间尺度算法^[11-13]; Breakiron 在估计 Kalman 滤波过程噪声参数的基础上, 用两参数 Kalman 滤波估计主动型氢钟和铯钟的频差和频漂, 生成频率稳定性与事后处理相当的时间尺度^[14-15]。

GPS 主控站采用 Kalman 滤波来实时监测所有卫星钟的运行状况。铯钟和被动型氢钟常采用阿伦系列方差分析其频率稳定性, 并在此基础上估计 Kalman 滤波过程噪声参数, 进而可采用 Kalman 滤波监测其运行状况; 而铷钟不仅有明

显的频漂,而且当平滑时间较长时,还会受到甚低频噪声影响,此时应采用三次采样方差-哈达玛方差, Hadamard-Q 方程能为运行应用提供无偏、收敛的估计结果^[8,16-17]。NGA 和美国海军研究所基于 Kalman 滤波对监测站原子钟、主控站原子钟以及卫星钟进行监测和运行分析,以发现钟在运行中存在的问题,并确定钟的性能指标,为 GPS 系统的运行维护提供了依据^[16,18-19]。为提高平滑时间较长时估值的置信度,应采用哈达玛总方差分析铷钟的频率稳定性。虽然国外学者在 Kalman 滤波实时参数估计方面做了许多研究工作,但基于哈达玛总方差估计 Kalman 滤波过程噪声参数的文献未见报导。考虑到铷钟的短期稳定性优于铯钟, GPS Block IIR 卫星上只搭载了 3 台铷钟, Galileo 卫星也将搭载 2 台铷钟和稳定性指标更好的 2 台被动型氢钟,我国自主的导航系统也采用铷钟,为此,本文将主要研究适用于铷钟的 Kalman 滤波方程。

2 Kalman 滤波方程及其估值

铷钟的 Kalman 滤波状态方程可表示为^[7]

$$\begin{bmatrix} x(t+\tau) \\ y(t+\tau) \\ z(t+\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, τ 为预报时间; $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 分别为 t 时刻的时差、频差和频漂值,且 $y(t)$ 是 $x(t)$ 的时间导数, $z(t)$ 是 $y(t)$ 的时间导数; Δx 、 Δy 和 Δz 为独立于 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 的随机模型误差,其均值为零。

式(1)可表示为如下简化形式

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \quad (2)$$

式中, $\mathbf{X}_k = [x(t+\tau) \ y(t+\tau) \ z(t+\tau)]^T$ 为 t_k 时刻的 3 维状态向量, t_k 时刻与 t_{k-1} 时刻的时间间隔为 τ ; $\Phi_{k,k-1}$ 为 3×3 维状态转移矩阵; \mathbf{W}_k 为 3 维动态模型误差向量,其协方差阵为 Σ_{W_k} , 可以表示成 Kalman 滤波过程噪声参数(q_s)的函数^[7-8]

$$\Sigma_{W_k} = E \left[\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y & \Delta z \end{bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} q_1 \tau + q_2 \tau^3/3 + q_3 \tau^5/20 & q_2 \tau^2/2 + q_3 \tau^4/8 & q_3 \tau^3/6 \\ q_2 \tau^2/2 + q_3 \tau^4/8 & q_2 \tau + q_3 \tau^3/3 & q_3 \tau^2/2 \\ q_3 \tau^3/6 & q_3 \tau^2/2 & q_3 \tau \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, q_1 为对应于 Δx 的过程噪声参数,可用调相随机游走噪声($\alpha=0$)描述; q_2 为对应于 Δy 的过程噪声参数,可用调频随机游走噪声($\alpha=-2$)描述; q_3 为对应于 Δz 的过程噪声参数,可用调频随机奔跑噪声($\alpha=-4$)描述。

铷钟时差数据的观测方程可表示为

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_k + \Delta_k \quad (4)$$

式中, $\mathbf{L}_k = x(t+\tau)$ 为 1 维观测向量; $\mathbf{A}_k = [1 \ 0 \ 0]$ 为 1×3 维设计矩阵; Δ_k 为 1 维观测噪声向量,其均值和协方差阵分别为零和 Σ_{Δ_k} ,且 Δ_k 和 \mathbf{W}_k 不相关。

根据式(2),预报状态向量及其协方差矩阵可分别表示为

$$\bar{\mathbf{X}}_k = \Phi_{k,k-1} \bar{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (5)$$

$$\Sigma_{\bar{\mathbf{X}}_k} = \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\bar{\mathbf{X}}_{k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + \Sigma_{w_k} \quad (6)$$

式中, $\bar{\mathbf{X}}_{k-1}$ 和 $\Sigma_{\bar{\mathbf{X}}_{k-1}}$ 分别是 t_{k-1} 时刻的状态向量估值及其协方差阵。

结合式(4), Kalman 滤波估值及其协方差矩阵可表示为如下形式

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \bar{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{L}_k - \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{X}}_k) \quad (7)$$

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{X}}_k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{A}_k) \Sigma_{\bar{\mathbf{X}}_k} \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_k = \Sigma_{\bar{\mathbf{X}}_k} \mathbf{A}_k^T (\mathbf{A}_k \Sigma_{\bar{\mathbf{X}}_k} \mathbf{A}_k^T + \Sigma_{\Delta_k})^{-1} \quad (9)$$

于是, Kalman 滤波时差估值和预报值的残差均方根可分别按以下两式计算

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (\hat{x}(t_i) - x(t_i))^2}{l}} \quad (10)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (x(t_i) - \hat{x}(t_i))^2}{l}} \quad (11)$$

式中, $\hat{x}(t_i)$ 和 $x(t_i)$ 分别为 t_i 时刻的 Kalman 滤波时差估计值和预报值; $x(t_i)$ 为 t_i 时刻的时差观测值; l 为时差估计值或预报值的个数。

由式(5)~式(9)可知,求解 Kalman 滤波方程关键是确定状态噪声协方差阵和观测量协方差阵,而状态噪声协方差阵可由原子钟的 Kalman 滤波过程噪声参数来表示,因此,有必要研究铷钟的 Kalman 滤波过程噪声参数计算方法。

3 基于哈达玛总方差的 Kalman 滤波过程噪声参数估计

基于时差数据的哈达玛总方差表达式为^[19]

$$H \sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \frac{1}{(6m\tau_0)^2 (N-3m)} \sum_{n=1}^{N-3m} \left(\frac{1}{6m} \sum_{l=n-3m}^{n+3m-1} l^0 x_{\#}^{\#} \right)^2$$

$$3\{^0x_{i+2m}^{\#} + 3\{^0x_{i+m}^{\#} - ^0x_i^{\#}\}^2\} \quad (12)$$

式中, $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间, m 为平滑因子; τ_0 为原始数据采样间隔; N 为时差数据个数; $\{^0x_i^{\#}\}$ 为由去除频漂的原始时差数据子序列映射延伸得到的子序列。

为了方便分析哈达玛总方差, 式(12)可表示为如下简化形式

$$H \sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \frac{1}{6\tau} E[x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i]^2 = \frac{1}{6\tau} E[(x_{i+3} - x_{i+2}) - (x_{i+2} - x_{i+1}) - (x_{i+2} - x_{i+1}) + (x_{i+1} - x_i)]^2 \quad (13)$$

结合式(1), 计算相邻时差、频差、频漂数据的差分, 并代入式(13), 整理可得^[17]

$$H \sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \frac{1}{6\tau} \{E[\Delta x_{i+3}]^2 + E[-2\Delta x_{i+2} + \tau \Delta y_{i+2} + (\tau^2/2) \Delta z_{i+2}]^2 + E[\Delta x_{i+1} - \tau \Delta y_{i+1} + (\tau^2/2) \Delta z_{i+1}]^2\} \quad (14)$$

结合式(3), 计算式(14)右端三项^[17]。于是, 式(14)可表示为

$$H \sigma_{\text{total}}^2(\tau) = q_1 \tau^{-1} + q_2 \tau/6 + 11q_3 \tau^3/120 \quad (\alpha = 0, -2, -4) \quad (15)$$

其中, q_1, q_2, q_3 分别为对应于 $\alpha = 0, -2, -4$ 的 Kalman 滤波过程噪声参数, 而 α 表示能量谱噪声指数, $\alpha = 0, -2, -4$ 分别对应调频白噪声、调频随机游走噪声和调频随机奔跑噪声。

式(15)仅包含三种噪声, 而铷钟不仅受以上三种噪声影响, 还会受调相白噪声($\alpha = 2$)影响, 此时需要用代表性误差来补偿。假设调相白噪声是铷钟的惟一主要噪声分量, 此时所有时差数据不相关, 于是, 可令 $q_0 = E[x_i]^2$, 且 q_0 与时间无关。式(13)可表示为

$$H \sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \frac{1}{6\tau} \{E[x_{i+3}]^2 + E[-3x_{i+2}]^2 + E[3x_{i+1}]^2 + E[-x_i]^2\} = \frac{10}{3\tau^2} q_0 \quad (16)$$

当调相白噪声和状态噪声协方差阵包含的三种调频噪声同时存在, 且假设调相白噪声与其他三种噪声不相关时, 式(15)和式(16)可合并为

$$H \sigma_{\text{total}}^2(\tau) = (10/3)q_0 \tau^{-2} + q_1 \tau^{-1} + q_2 \tau/6 + 11q_3 \tau^3/120 \quad (\alpha = 2, 0, -2, -4) \quad (17)$$

上式把原子钟的时差观测量和 Kalman 滤波过程噪声参数联系起来, 用三个独立的过程噪声参数 q_1, q_2, q_3 描述原子频标噪声, 用代表性误差

参数 q_0 表示测量噪声, 参数 q_0 主要用来吸收调相白噪声和调相闪变噪声, 以及模型误差影响。

由推导过程可知, 铷钟状态估计采用二次多项式模型, 没有考虑频漂的时变延迟参数, 实际上, 铷钟的频漂不是一常量, 而是随时间变化的量, 因此, Kalman 滤波随机参数还吸收了部分没有模型化的频漂变化。当预报时间不长时, 可认为铷钟的频漂为一常量; 如果要对铷钟进行长期预报分析, 从理论上讲, 尽量不要用统计方法描述系统性变化分量, 而应采用函数模型(如对数模型、指数模型)来估计频漂的非线性变化分量。

4 计算与分析

为了验证上述过程噪声参数估计方法的有效性, 并分析铷钟的 Kalman 滤波预报特性, 采用 Block IIR PRN16 事后处理的采样间隔为 5 min 的精密钟差文件进行计算分析, 从 2004 年 9 月 26 日 0 点至 2005 年 8 月 10 日 23 点 55 分约 319 天的数据, 数据已进行过预处理, 没有明显的异常点。首先采用前 284 天的数据对卫星钟进行频率稳定性分析, 计算其哈达玛总方差, 在此基础上估计这台钟的过程噪声参数^[17], 进而给出状态噪声协方差阵和测量噪声方差; 而后, 采用后 35 天数据用标准 Kalman 滤波估计铷钟的三个状态参数, 即时差、频差和频漂, 并对铷钟的 Kalman 滤波预报特性进行计算分析。

在计算 Kalman 滤波过程噪声参数时, 由式(17)组成观测方程, 其观测向量的协方差阵可根据平滑时间 τ 上 $H \sigma_{\text{total}}^2(\tau)$ 的 1σ 置信区间的平方来计算。由此估计的过程噪声参数 q_0, q_1, q_2 和 q_3 分别为 1.60×10^{-4} 、 2.3×10^{-22} 、 1.5×10^{-32} 和 4.2×10^{-44} 。

计算出过程噪声参数后, 由式(3)估计状态噪声协方差阵。 q_0 参数即为时差观测量的测量精度, 不过 q_0 参数还吸收了部分模型误差。基于上述噪声协方差阵估计的 Kalman 滤波状态参数估计值和预报值见图 1~ 图 3。

由图 1~ 图 3 可知, 基于哈达玛总方差分析计算出 Kalman 滤波方程的状态噪声协方差阵和测量噪声方差后, 用 Kalman 滤波对铷钟进行实时状态参数估计是可行的, Kalman 滤波时差分量估计值与测量值的残差均方根不到 1 ns。

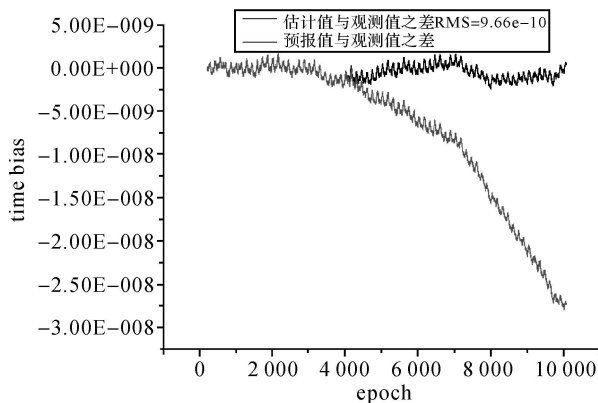


图 1 时差分量的估计值和预报值

Fig. 1 Estimated and predicted time bias

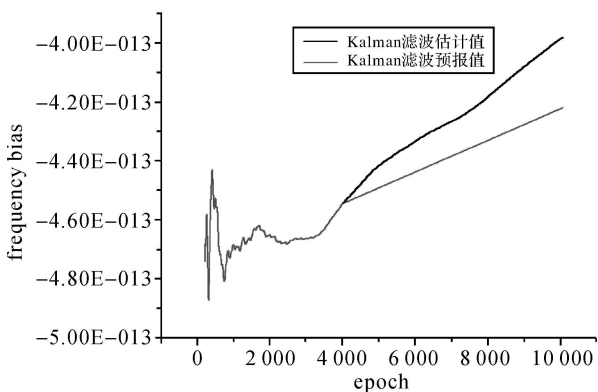


图 2 频差分量的估计值和预报值

Fig. 2 Estimated and predicted frequency bias

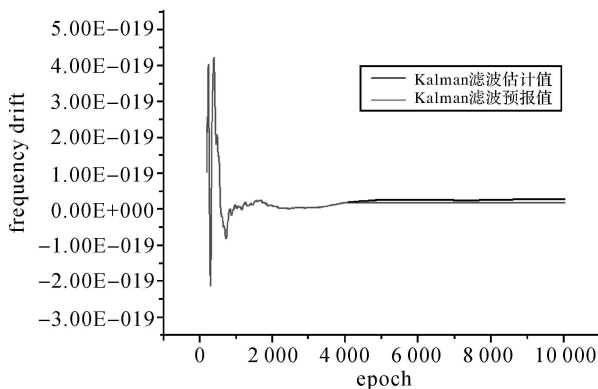


图 3 频漂分量的估计值和预报值

Fig. 3 Estimated and predicted frequency drift

由图 1~ 图 3 和表 1 可知, Kalman 滤波可用于对卫星钟状态参数进行预报, 如时差、频差和频漂。为了分析预报精度, 计算了时差数据不同预报时间的残差均方根, 结果表明, 当预报时间为 1 h 时, 预报精度在 1 ns 左右; 当预报时间为 6 h

时, 预报精度在 (8~ 9) ns 之间; 当预报时间为 1 d 时, 预报精度在 (30~ 40) ns 之间; 当预报时间达到 15 d 时, 预报精度在 (500~ 600) ns 之间, 接近于微秒量级 10^{-6} 。

表 1 时差分量的 Kalman 滤波预报精度

Tab. 1 Kalman Prediction precision of time error /s					
5 min	30 min	1 h	2 h	3 h	
<i>RMS</i> 9.0×10^{-10}	8.3×10^{-10}	1.3×10^{-9}	2.6×10^{-9}	4.1×10^{-9}	
4 h	6 h	12 h	1 day	2 day	
<i>RMS</i> 5.6×10^{-9}	8.6×10^{-9}	1.8×10^{-8}	3.6×10^{-8}	7.3×10^{-8}	
3 day	4 day	6 day	12 day	15 day	
<i>RMS</i> 1.1×10^{-7}	1.5×10^{-7}	2.2×10^{-7}	4.4×10^{-7}	5.5×10^{-7}	

由于卫星钟观测数据每个历元只有一个观测值, 无法进行粗差探测, 于是观测量的质量控制是一个问题。当数据质量不太好时, 把观测噪声方差设一较大数值, 此时充分利用状态方程信息, 标准 Kalman 滤波仍可给出可靠的参数估值。

5 结 论

1. 基于哈达玛总方差分析计算出 Kalman 滤波的状态噪声协方差阵和测量噪声方差后, 用 Kalman 滤波进行铷钟的实时状态参数估计是可行的, 主控站可用该方法实时监测卫星钟运行状况, 并在此基础上分析时差、频差和频漂的变化规律。

2. 该方法充分利用了原子钟噪声信息, 可用于对卫星钟时差、频差和频漂进行短期预报。

需要说明的是, 所有计算都是基于这样一个假设前提: 频漂为线性。当预报时间较短时, 可以认为频漂在这一时间段内为线性; 而当预报时间较长时, 需要考虑原子钟频漂的非线性特性, 这也是上述 Kalman 滤波模型不适用于长期预报的原因之一。此时应采用对数模型或指数模型等来拟合频漂, 以提高预报精度, 这是下一步的工作。

参考文献:

[1] SHMALIY Y S, IBARRA M O, ARCEO M L. A Numerical Comparison of the Unbiased FIR and Kalman Filters in Applications to GPS-based Timekeeping [C] // Proceedings of the 37th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Vancouver: [s. n.], 2005: 668-671.

[2] SHMALIY Y S, MARIENKO A V, SAVCHUK A V. GPS-based Optimal Kalman Estimation of Time Error, Frequency Offset and Aging [C] // Proceedings of the 31st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting.

- California: [s. n.], 2000: 431-440.
- [3] SU W, FILLER R L. Application of Kalman Filtering Techniques to the Precision Clock with Non-constant Aging [C] // 1992 IEEE Frequency Control Symposium. Pennsylvania: [s. n.], 1992: 231-237.
- [4] SU W, FILLER R L. A New Approach to Clock Modeling and Kalman Filter Time and Frequency Prediction [C] // 1993 IEEE Frequency Control Symposium. Salt Lake City: [s. n.], 1993: 331-334.
- [5] STEIN S R. Kalman Filter Analysis of Precision Clocks with Real-time Parameter Estimation [C] // 43rd Annual Frequency Control Symposium. Denver: [s. n.], 1989: 232-236.
- [6] STEIN S R, FILLER R L. Kalman Filter Analysis for Real Time Applications of Clocks and Oscillators [C] // 42nd Annual Frequency Control Symposium. Baltimore: [s. n.], 1988: 447-452.
- [7] HUTSELL S T. Relating the Hadamard Variance to MCS Kalman Filter Clock Estimation [C] // Proceedings of the 27th Annual PTTI Syst Applications Meeting. San Diego: [s. n.], 1995: 291-301.
- [8] HUTSELL S T, REID W G, BUISSON J A, et al. Operational Use of the Hadamard Variance in GPS [C] // Proceedings of the 28th Annual PTTI Syst Applications Meeting. Reston: [s. n.], 1996: 201-213.
- [9] EPSTEIN M, FREED G, RAJAN J. GPS IIR Rubidium Clocks: In-orbit Performance Aspects [C] // Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. San Diego: [s. n.], 2003: 117-134.
- [10] DAVIS J A, GREENHALL C A, STACEY P W. A Kalman Filter Clock Algorithm for Use in the Presence of Flicker Frequency Modulation Noise [C] // Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. San Diego: [s. n.], 2003: 281-296.
- [11] GREENHALL C A. Forming Stable Timescales from the Jones-Tryon Kalman Filter [J]. *Metrologia*, 2003, 40 (3): 335-341.
- [12] 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.)
- [13] YANG Yuanxi, GAO Weiguang. Integrated Navigation by Using Variance Component Estimates of Multi-sensor Measurements and Adaptive Weights of Dynamic Model Information [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33 (1): 22-26. (杨元喜, 高为广. 基于方差分量估计的自适应融合导航[J]. *测绘学报*, 2004, 33(1): 22-26.)
- [14] BREAKIRON L A. A Kalman Filter for Atomic Clocks and Timescales [C] // Proceedings of the 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Long Beach: [s. n.], 2001: 431-444.
- [15] BREAKIRON L A. Kalman Filter Characterization of Cesium Clocks and Hydrogen Masters [C] // Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Reston: [s. n.], 2002: 511-526.
- [16] HOWE D A, BEARD R L, GREENHALL C A, et al. Enhancements to GPS Operations and Clock Evaluations Using a "Total" Hadamard Deviation [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2005, 52 (8): 1253-1261.
- [17] GUO Hairong. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites [D]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 2006: 151-157. (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: 151-157.)
- [18] MANNING D M. NGA GPS Monitor Station High-performance Cesium Frequency Standard Stability: From NGA Kalman Filter Clock Estimators [C] // Proceedings of the 37th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Vancouver: [s. n.], 2005: 840-849.
- [19] OAKS J, SENIOR K, LARGAY M, et al. NRL Analysis of GPS On-orbit Clocks [C] // Proceedings of the 37th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Vancouver: [s. n.], 2005: 12-18.

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2008-05-07

修回日期: 2009-10-23

第一作者简介: 郭海荣(1977—), 女, 博士, 主要从事高精度 GPS 动态数据处理、导航卫星原子钟时频特性等方面的研究。

First author: GUO Hairong, (1977—), female, PhD, majors in precise kinematic GPS data processing and quality control, time and frequency characterization of an atomic clock.

E-mail: hairongguo@263.net