

基于灰色模型和混沌时间序列的 卫星钟差预测算法

黄飞江^{1,2}, 陈演羽^{1,2}, 李廷会², 袁海波³, 单庆晓¹

(1. 长沙学院电子信息与电气工程学院, 湖南长沙 410022;

2. 广西师范大学电子工程学院, 广西桂林 541004; 3. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600)

摘要: 为了提高非线性卫星钟差预测的精度,降低单一钟差预测模型对钟差预测的风险,提出了一种组合模型的卫星钟差预测算法. 该算法首先采用 db1 小波对卫星钟差序列进行 3 层多分辨率分解和单支重构,得到一个趋势分量和三个细节分量,然后运用灰色预测模型对重构后的趋势分量和混沌一阶加权局域预测法对重构后的细节分量分别进行预测,最后将各分量预测结果相加后得到总的钟差预测值. 以 GPS 卫星钟差数据做算例分析,在 6 小时的钟差预测中,算法绝对误差最大值比单一的灰色预测模型误差小 1.3ns 以上. 将该组合预测模型用于非线性卫星钟差预测中,可以提高钟差预测的精度和可靠性.

关键词: 卫星钟差; 小波分解; 灰色模型; 混沌时间序列; 一阶加权局域预测

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)07-1416-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.004

A Satellite Clock Bias Prediction Algorithm Based on Grey Model and Chaotic Time Series

HUANG Fei-jiang^{1,2}, CHEN Yan-yu^{1,2}, LI Ting-hui², YUAN Hai-bo³, SHAN Qing-xiao¹

(1. College of Electronic Information and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha, Hunan 410022, China;

2. College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of nonlinear satellite clock bias prediction and reduce the risk of single clock bias prediction model for clock bias prediction, a satellite clock bias prediction algorithm based on combined model is proposed. The algorithm firstly uses db1 wavelet to conduct a 3 layer multiresolution decomposition and single branch reconstruction of satellite clock bias sequences, and obtains a trend component and three detail components. Then the grey prediction model is used to predict the reconstructed trend component and the chaotic time series one-order weighted local prediction method is used to predict the reconstructed detail components. Finally, each component prediction result is added to obtain the total clock bias prediction value. Taking the GPS satellite clock bias data as an example, the maximum absolute error of the algorithm is at least 1.3ns smaller than that of a single gray prediction model in 6-hour clock bias prediction. This combined prediction model can be applied to the prediction of nonlinear satellite clock bias, which can improve the accuracy and reliability of clock bias prediction.

Key words: satellite clock bias; wavelet decomposition; grey model; chaotic time series; one-order weighted local prediction

1 引言

时间同步作为网络运行以及节点协同的基础,是实现空间信息网络大时空跨度网络体系结构的保

障^[1]. 全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是通过测量时间差来进行定位和授时,为保证导航定位的解算精度,必须要保证系统的时间同步^[2,3]. 在自主卫星导航系统中,也要求各卫星原子钟

收稿日期:2018-04-17;修回日期:2019-01-10;责任编辑:孙瑶

基金项目:国家自然科学基金(No. 61264008, No. 11773030, No. 11373075);湖南省自然科学基金(No. 2015JJ2016);长沙学院“青年英才支持计划”和科研基金(No. SF1615)

时间与系统时间同步,而时间同步则需要知道系统各卫星的精确钟差值,这就必须建立钟差预报模型对卫星钟差进行精确预报^[4].星载原子钟在轨运行期间,由于受到复杂的太空环境和自身设备的不稳定性等因素影响,导致其输出的钟差时间序列不可避免的出现非线性特性^[5],这些因素无法避免和消除,只能通过数学模型的方法进行补偿.国际 GPS 服务机构(International GPS Service, IGS)网站发布的卫星钟差预报误差为 0.1ns,定位精度优于 10cm,但这都是事后 13 天的结果,精确度虽然高,但实时性较差,无法满足人们对于实时性单点定位的需求.

目前出现了诸多卫星钟差预报模型,如线性模型,二次多项式模型,灰色模型^[6],Kalman 滤波器模型^[7]和神经网络模型等^[8].其中二次多项式预测模型物理意义明确,计算简单,在短期钟差预报中适合,在长期的卫星钟差预报中会随着时间的累计,误差变大;灰色预测模型需要样本数据少,适合中长期的钟差预报,但对数据需要呈现指数或者线性变化特征要求;Kalman 滤波器预测算法适合短期预测,在历史钟差数据充足的情况下,能够对钟差做出最优预报,但无法给出精确的跳变预报值.

在以上单一的钟差预测模型中,线性模型和灰色预测模型等能够对线性递增或者递减的卫星钟差预测较好,但对于非线性、非平稳变化的钟差序列,单一的钟差预测模型预测风险较大.为提高钟差预测的稳定性,降低风险^[9],提出了基于小波分析与神经网络组合的模型^[10],基于灰色模型与接收机自主完好性监测(Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM)的卫星钟差预报模型^[11],基于灰色模型与最小二乘支持向量机的卫星钟差预报模型^[12].这些组合模型在非线性和非平稳卫星钟差的预测中,可以综合单一模型的优点,提高了预测的精度,改善了预测结果.

由卫星钟差的二次多项式预报模型可知^[13],钟差包含趋势项、周期项和随机项,其中随机项由 3 到 5 种噪声组成,影响钟差的趋势,使钟差呈现非平稳特性.本文通过将卫星钟差序列进行小波分解,然后根据分解和重构后的不同分量特征,运用不同的预测模型对分量进行预测,提高了钟差预测的精度和可靠性.

2 小波分解与重构

2.1 小波变换的定义

小波变换是时间与频率的局部变换,通过伸缩和平移等运算对函数进行多尺度细化分析.设函数 $f(t) \in L^2(R)$,则小波变换的定义为^[14,15]:

$$W_{f(s,\tau)} = \langle f, \psi_{s,\tau} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (1)$$

式中, $\psi_{s,\tau}(t)$ 是由基本函数 $\psi(x)$ 进行平移 τ 和伸缩 s 得到的一组小波基函数,表达式为:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), s, \tau \in R, s \neq 0 \quad (2)$$

在实际应用中,信号为离散的一维或者二维信号,所以必须将连续小波变换离散化.通常将连续小波 $\psi_{s,\tau}(t)$ 中的 τ, s 离散化,取 $\tau = k\tau_0 s_0^j, s = s_0^j (s_0 \neq 1, \tau_0 \in R, j, k \in Z)$,则对应的离散小波变换函数为:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi\left(\frac{t-k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right), j, k \in Z \quad (3)$$

式(3)中,通常取 $s_0 = 2, \tau_0 = 1$,这时小波称为二进小波,此时伸缩尺度就为 2^j ,平移尺度为 $2^j k$,由此得到二进小波.

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right), j, k \in Z \quad (4)$$

小波变换对信号具有自适应性,即对不同频率在时域上的取样步长是可调节的,对低频部分时间分辨率较低,而频率分辨率较高,对高频部分时间分辨率较高,而频率分辨率较低.

2.2 序列的分解与重构

设一维时间序列为 $X(t), t = 1, 2, 3, \dots, N$.对 $X(t)$ 进行 j 层多尺度分解,得到一个近似分量 cA_j 和 j 个细节分量 $cD_i, i = 1, 2, \dots, j$,经分解后的一维时间序列每一层分量的点数都是上一层点数的一半.点数的减少对钟差序列的预测不理想,所以需要对小波分解后的近似分量和细节分量进行单支重构.重构是分解的逆过程,重构后的分量点数和原始时间序列点数一样,设单支重构后的近似分量和细节分量分别为 A_j 和 $D_j, i = 1, 2, \dots, j$,则 $X(t)$ 可以表示为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^j D_j + A_j \quad (5)$$

选取合适的小波函数对非线性钟差序列进行多尺度分解和重构,有利于对钟差序列进行不同时频域分析.

3 灰色预测模型

灰色系统是介于白色系统和黑色系统之间的一种系统,白色系统是内部信息透明的系统,黑色系统是内部信息完全未知的系统,灰色系统是内部信息一部分透明,一部分未知的系统^[16].

灰色预测是指对既含有已知信息又含有不确定信息的系统进行的预测,也就是对在一定范围内变化的且与时间序列有关的灰过程进行预测.现在应用最广泛的灰色系统预测模型是只含有一个未知变量、一阶微分的 GM(1,1)模型.它是基于随机的原始时间序列,经按时间累加后所形成的新的时间序列呈现的规律可

用一阶线性微分方程的解来逼近的过程. GM(1,1) 实现步骤如下^[17].

①设时间序列为 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 为建立灰色预测模型, 首先对钟差序列 $X^{(0)}$ 进行一次累加运算生成一次累加序列 $X^{(1)} = \{X^{(1)}(k), k = 1, 2, \dots, n\}$, 公式为:

$$X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i) = X^{(1)}(k-1) + X^{(0)}(k) \quad (6)$$

对 $X^{(1)}$ 建立一阶微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (7)$$

其中, a 为灰系数, 表示序列值的发展态势, u 为灰作用量, 大小反应序列的变化关系. 式(7)的离散响应为:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left(X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (8)$$

式(8)中, k 为时间序列.

②令 $\hat{a} = [a, u]^T$, 应用最小二乘法, 则 \hat{a} 的解由式(9)可得:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (9)$$

式(9)中, B 为数据阵, Y_n 为数据列:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Y_n = (X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n))^T \quad (11)$$

③由于 GM(1,1) 模型预测的是一次累加值 $\hat{X}^{(1)}(k+1)$ 的结果, 需要将预测数据 $\hat{X}^{(1)}(k+1)$ 经过累减还原为 $\hat{X}^{(0)}(k+1)$, 则预测后原始序列的结果为:

$$\hat{X}^{(0)}(k) = \hat{X}^{(1)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k-1) \quad (12)$$

卫星钟差序列受诸多因素作用影响, 有确定的因素, 也有不确定的因素, 将钟差序列经过小波分解后的近似分量用灰色模型 GM(1,1) 进行预测, 有利于提高钟差预测精度.

4 混沌时间序列一阶加权局域预测

Takens 定理认为系统中任一分量的演化都是由与之相互作用的其他分量所决定的, 这些相关分量的信息隐含在任一分量的发展过程中. 通过求取一维时间序列的嵌入维数 m 和时间延迟 τ , 将时间序列构筑到 m 维空间中. 混沌时间序列一阶加权局域预测法是在 m 维相空间中进行计算^[18-20].

一阶加权局域预测法在相空间中通过求取邻近点的权值来拟合一阶线性运动轨迹, 逼近相空间演化

趋势. 定义中心点 $X(M)$ 的邻近点权值为:

$$P_i = \frac{\exp(-a(d_i - d_m))}{\sum_{i=1}^q \exp(-a(d_i - d_m))} \quad (13)$$

a 一般取 $a = 1$, 则一阶局域线性拟合为:

$$X_{hi+1} = ae + bX_{hi} \quad (14)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, q$, $e = (1, 1, \dots, 1)^T$, 下面简述加权一阶局域算法步骤.

①重构时间序列 $x(t)$ 得到相空间 $X(i)$.

②寻找中心点 $X(M)$ 的邻近相点, 并计算各相点到中心点之间的欧氏距离, 得出中心点 $X(M)$ 的参考相点集 $X(M_i), i = 1, 2, \dots, q$, 根据式(13)计算参考向量集相点的权值 P_i .

③一阶加权局域线性拟合预测计算步骤:

$$\begin{bmatrix} X_{M_{1,1}} \\ X_{M_{2,1}} \\ \vdots \\ X_{M_{q,1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & X_{M_1} \\ e & X_{M_2} \\ \vdots & \vdots \\ e & X_{M_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \text{其中 } e = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

当 $m = 1$ 时, 得式(16):

$$\begin{bmatrix} x_{M_{1,1}} \\ x_{M_{2,1}} \\ \vdots \\ x_{M_{q,1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & x_{M_1} \\ e & x_{M_2} \\ \vdots & \vdots \\ e & x_{M_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (16)$$

应用加权最小二乘法计算有:

$$\sum_{i=1}^q P_i (x_{M_{i+1}} - a - bx_{M_i})^2 = \min \quad (17)$$

将式(17)看做是 a, b 的二元函数, 求得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^q P_i (x_{M_{i+1}} - a - bx_{M_i}) = 0 \\ \sum_{i=1}^q P_i (x_{M_{i+1}} - a - bx_{M_i}) x_{M_i} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

解方程式(18)得到 a, b 的值, 代入式(17)得到预测公式.

④根据预测公式预测, 参考相点集 X_{M_i} 的一步预测为 $X_{M_{i+1}}, i = 1, 2, \dots, q$.

通过求取小波分解和单支重构钟差序列细节分量的嵌入维数 m 和时间延迟 τ , 然后进行相空间重构, 将混沌时间序列一阶加权局域预测法应用于细节分量的预测中, 也可以提高非线性钟差序列的预测精度.

5 灰色模型和混沌时间序列组合的卫星钟差预测算法

首先根据小波函数和非线性钟差序列的特性, 选取合适的小波函数对原始钟差序列进行分解和重构, 钟差序列经小波 3 层多分辨率分解和单支重构如式

(19):

$$CLK = A_3 + \sum_{i=1}^3 D_i \quad (19)$$

式(19)中 CLK 为小波单支重构后的钟差序列, A_3 为钟差单支重构后的趋势项, 表示钟差序列的低频部分, D_i 为细节项, 表示钟差序列的高频部分. 由于原始钟差序列是由确定性部分和各种噪声综合后的结果, 因此经过小波分解和重构后的趋势分量代表了钟差序列的稳定走势, 其序列经过一次累加后符合灰色模型对数据呈现指数变化特性要求; 细节分量呈现非线性变化特征, 其序列经过相空间重构后, 符合一阶加权局域预测法对数据进行拟合的特性.

然后选取单支重构后的趋势分量合适的钟差点数, 运用灰色预测模型 $GM(1,1)$ 进行拟合; 对重构后的细节分量按照嵌入维数 m 和时间延迟 τ 进行相空间重构后, 运用混沌时间序列一阶加权局域预测法在相空间中对细节分量进行拟合, 提高了钟差预测的精度.

最后将趋势分量和细节分量拟合结果求和得到两者组合后的预测钟差值, 由此得到灰色预测模型 $GM(1,1)$ 和混沌时间序列一阶加权局域预测法构成的组合预测模型为:

$$T = T_g + \sum_{i=1}^3 f_i(m, \tau) T_i \quad (20)$$

式(20)中 T_g 为灰色预测模型 $GM(1,1)$ 对趋势项 A_3 分量的钟差预测值, T_i 为混沌时间序列一阶加权局域法对细节项 D_i 分量的钟差预测值, $f_i(m, \tau)$ 为拟合因子, 任一参数 m 和 τ 的改变都会影响着 T_i 预测拟合的精度, T 为组合预测模型最终的钟差预测值. 具体的钟差组合预测流程如图 1 所示.

由图 1 可得算法详细步骤如下.

①选取 dbN 小波系对钟差序列进行分解与重构, 其中 N 为小波的阶数. dbN 小波具有良好的正则性和时频支撑性, 使得信号重构过程比较光滑. 本文选取 $db1$ 小波对钟差序列进行 3 层多分辨率分解与单支重构, $db1$ 小波对信号单支重构具有对称特性, 使得钟差分解的近似项重构后呈现线性变化趋势, 符合灰色预测模型对数据建模要求. 同时 $db1$ 小波的线性相位特性, 使得对信号进行分解和重构时不会产生相位失真.

②将钟差序列运用 $db1$ 小波进行 3 层多分辨率分解和单支重构, 得到一项趋势分量 A_3 和 3 项细节分量 $D_1 \sim D_3$ 钟差序列.

③采用灰色预测模型 $GM(1,1)$ 与一阶加权局域预测法分别对小波分解和重构后的钟差序列进行预测. 趋势分量 A_3 选取最后 10 个钟差数据点, 运用灰色模型 $GM(1,1)$ 进行预测. 对 3 项细节分量 $D_1 \sim D_3$ 运用一阶加权局域法预测, 在细节分量的相空间重构中, 经实验

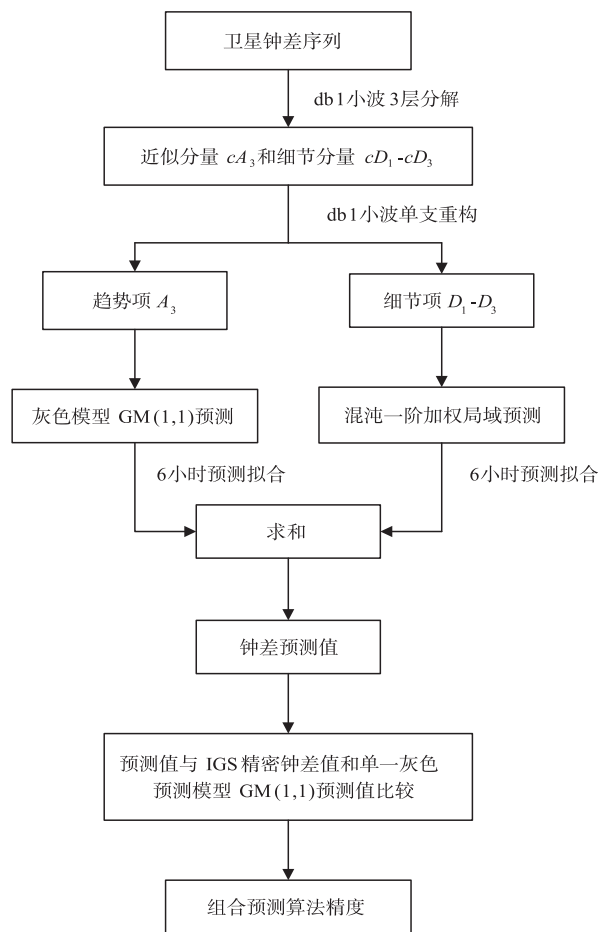


图1 组合预测模型流程图

获得细节分量的嵌入维数 $m = 3$, 时间延迟 $\tau \in [3, 8]$, 拟合因子 $f_i(m, \tau)$ 在 $m = 3$ 的前提下, 通过测验选取最佳时间延迟 τ , 可以提高拟合因子对钟差序列细节分量的预测精度.

④将灰色预测模型 $GM(1,1)$ 预测趋势分量钟差与一阶加权局域法预测细节分量钟差求和, 其求和结果与 IGS 精密钟差相减, 同时将其与单一灰色预测模型做绝对对最大值, 绝对平均值和均方值比较, 求得算法的预测精度.

与单一的预测模型相比, 本文算法将钟差进行小波分解和单支重构为趋势分量和细节分量, 并根据钟差分量的变化特征分别运用最优的预测模型进行预测拟合, 预测的结果将减小残差, 相比单一的预测模型, 具有更高的预测精度.

6 算例分析

为验证灰色预测模型和一阶加权局域预测法组合模型的预测精度和有效性, 实验原始数据从 2017 年 8 月 22 日采样间隔为 30s 的 igs19632. clk_30s 压缩钟差文件选取, 该钟差文件包含了 31 颗 GPS 卫星钟差序列

数据,其中选取编号为 G02、G06 和 G21 的钟差序列作为实验数据,它们的钟差序列如图 2 所示.

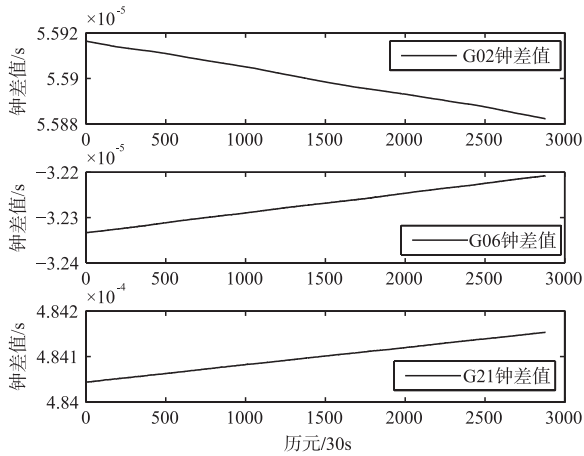


图2 卫星钟差时间序列

从图 2 可以看到,G02 钟差序列趋势表现为单调递减,G06 和 G21 钟差序列单调上升,且都呈现非线性特性.

6.1 钟差序列的小波分解与重构

利用 db1 小波对 G02、G06 和 G21 卫星钟差序列进行 3 层多分辨率分解,结果如图 3、图 4 和图 5 所示.

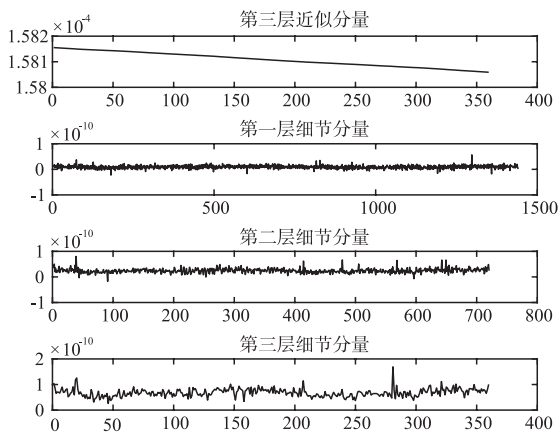


图3 G02钟差序列分解

从图 3、图 4 和图 5 可以看到,钟差序列经 db1 小波 3 层分解后,得到三项细节分量和一项趋势分量,每一层分解的序列点数比上一层序列点数少一半.趋势项走势呈现线性走向,三项细节分量呈现无规律的非线性特性.

利用 db1 小波对 G02、G06 和 G21 卫星钟差序列进行单支重构,结果如图 6、图 7 和图 8 所示.

图 6、图 7 和图 8 为分解后的钟差序列分量单支重构图,重构后的点数和原始钟差序列点数一样.由于 db1 小波对信号重构具有线性相位特性,消除了重构的相位失真.

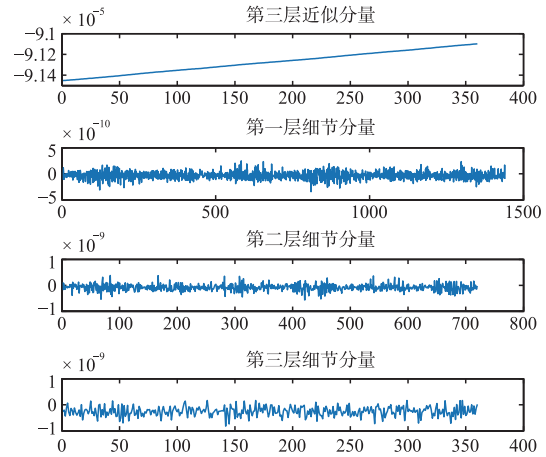


图4 G06钟差序列分解

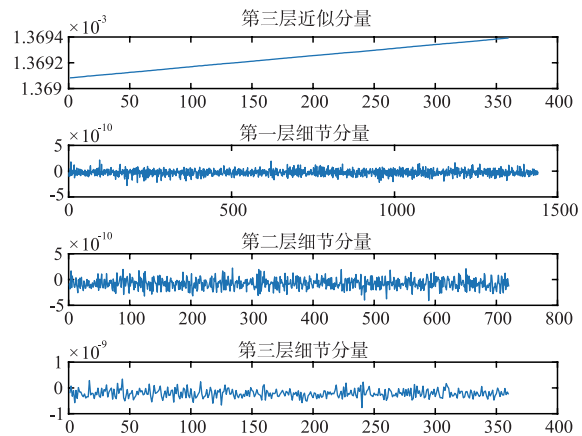


图5 G21钟差序列分解

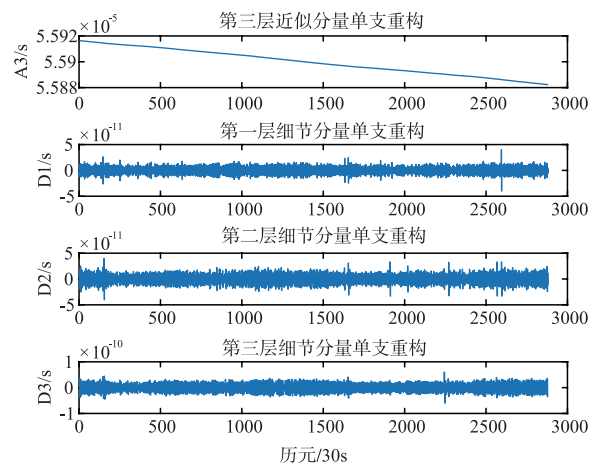


图6 G02钟差序列单支重构

6.2 钟差序列预测结果分析

以 G02、G06 和 G21 号卫星钟差序列为实验数据,分别运用单一的灰色预测模型 GM(1,1) 和组合模型预测 2017 年 8 月 23 日 6 小时的钟差,将两者的预测结果比较,同时将其与 IGS 精密钟差值进行比较.为便于区分显示预测值和 IGS 钟差值的关系,在不影响预测趋势

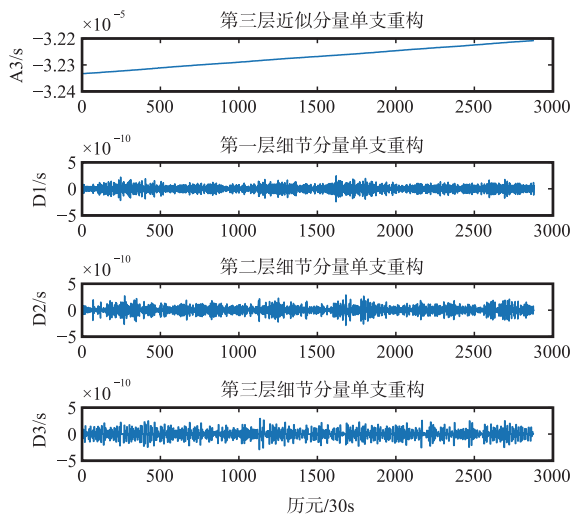


图7 G06钟差序列单支重构

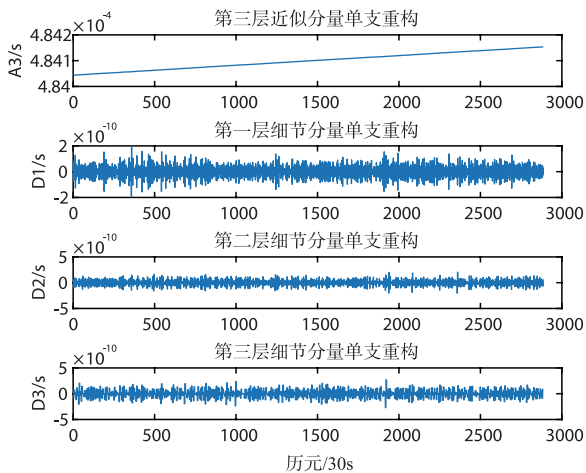


图8 G21钟差序列单支重构

的前提下,在预测的 720 个历元中等间隔抽取 36 个点显示,结果如图 9、图 10 和图 11 所示.

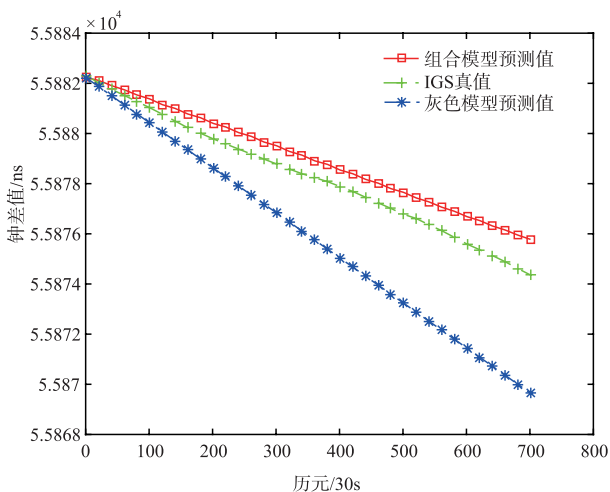


图9 G02钟差预测

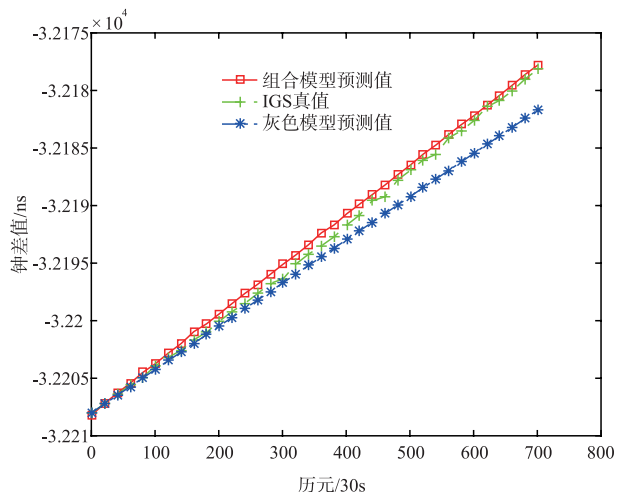


图10 G06钟差预测

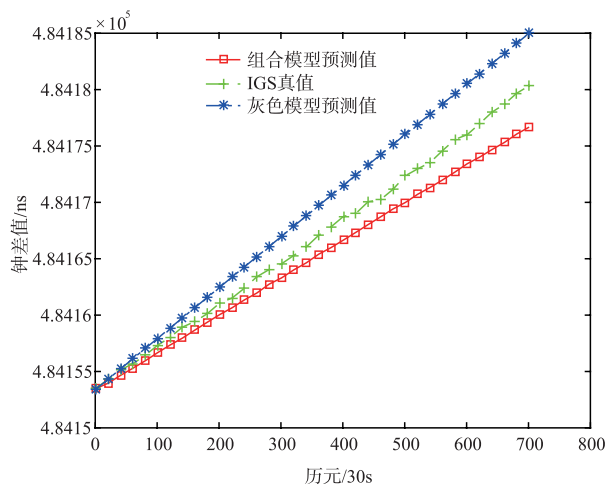


图11 G21钟差预测

由图 9、图 10 和图 11 可知,在单一的灰色预测模型和组合预测模型 6 小时的钟差预测中,随着预测时间的增加,预测值偏离 IGS 精密钟差值越大,但单一的灰色预测模型比组合预测模型的偏离更大.

G02、G06 和 G21 卫星钟差预测误差如图 12、图 13 和图 14 所示.

从图 12、图 13 和图 14 可得,在 6 小时预测误差分析中,G02 和 G21 卫星钟差序列的单一灰色预测模型偏差都比组合模型大,G06 钟差序列的组合预测误差变化较小,在预测点 350 前,组合预测模型误差比单一灰色预测模型误差稍大,在预测点 350 后,单一灰色预测模型误差逐渐增大,而组合预测模型误差呈现减小趋势.

分别对单一的灰色预测模型和组合预测模型进行 1 小时,3 小时和 6 小时的预测,其与 IGS 精密钟差误差的绝对最大值、绝对误差平均值和均方值统计,结果如表 1 所示.

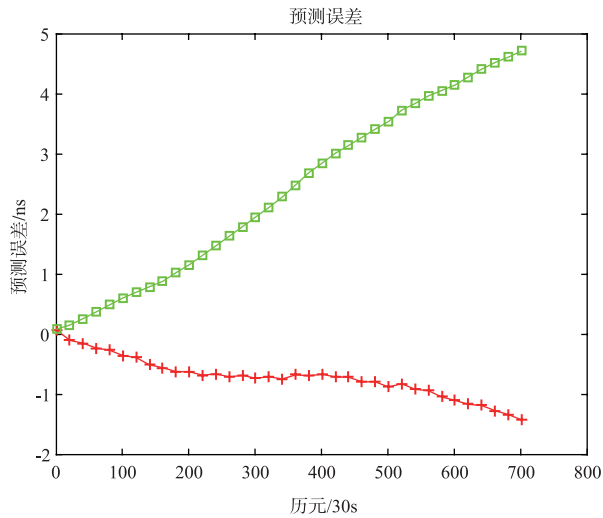


图12 G02预测误差

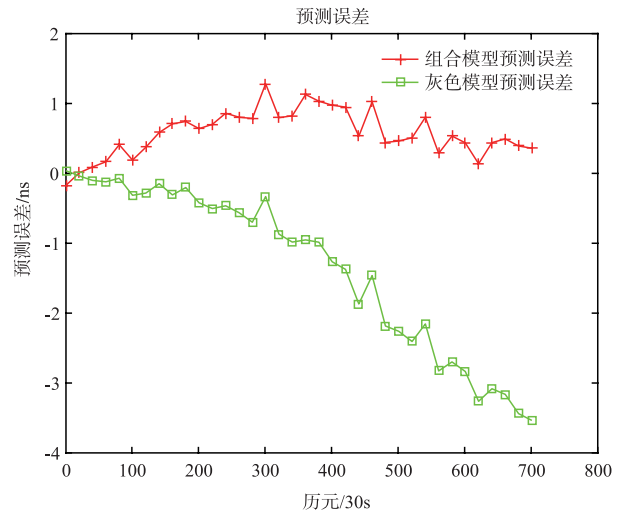


图13 G06预测误差

表1 单一 GM(1,1)与组合模型钟差预测误差最大值、平均值和均方值统计表

卫星号	预测时长/h	预测方法	绝对最大值/ns	绝对平均值/ns	均方值
G02	1	单一 GM(1,1)	0.6942	0.3709	0.4185
		组合模型	0.4082	0.1928	0.2211
	3	单一 GM(1,1)	2.4844	1.1219	1.3181
		组合模型	0.7557	0.4801	0.5297
	6	单一 GM(1,1)	4.8445	2.4458	2.8623
		组合模型	1.4686	0.7141	0.7873
G06	1	单一 GM(1,1)	0.3474	0.1205	0.1451
		组合模型	0.7047	0.3274	0.3728
	3	单一 GM(1,1)	1.2495	0.3630	0.4653
		组合模型	1.5606	0.7083	0.7931
	6	单一 GM(1,1)	3.8414	1.3994	1.8418
		组合模型	1.5606	0.6700	0.7417
G21	1	单一 GM(1,1)	1.1854	0.3561	0.4801
		组合模型	0.9449	0.4548	0.5049
	3	单一 GM(1,1)	3.0864	1.3117	1.5742
		组合模型	1.7664	0.8972	0.9868
	6	单一 GM(1,1)	5.1441	2.6347	3.0388
		组合模型	3.8849	1.6982	1.9598

由表1可得,组合预测模型对G02和G21卫星钟差序列的绝对误差最大值、绝对误差平均值和均方值都比单一的灰色预测模型GM(1,1)小.组合预测模型对G06卫星钟差序列在3小时的预测误差值比单一的灰色预测模型GM(1,1)稍大,在6小时的钟差预测误差值比灰色预测模型小,且误差有减小的趋势.

7 结论

本文通过将卫星钟差进行小波多尺度分解和单支重构,根据分解重构后的钟差序列分量变化特征,选取合适的钟差预测组合模型,其中趋势项采取灰色模型GM(1,1)预测,细节分量采用一阶加权局域预测法预测,将预测结果与IGS精密钟差值和单一使用灰色模型预测结果比较,实验结果证明了灰色模型和混沌时

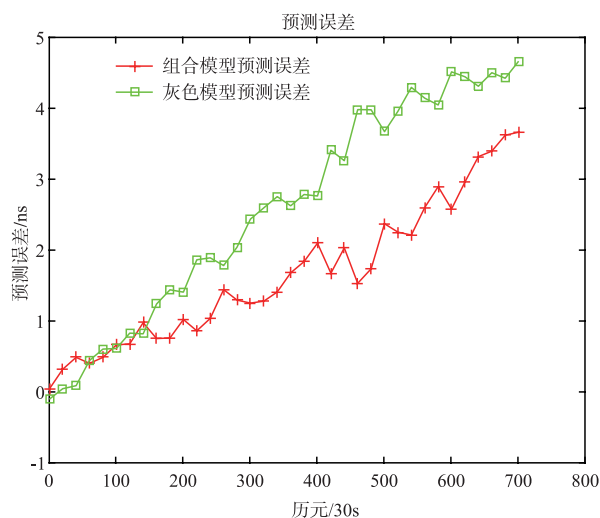


图14 G21预测误差

间序列一阶加权局域预测组合模型用于非线性卫星钟差预测的可靠性和有效性,且提高了单一钟差预报的精度,降低了单一预测模型的预测风险.结合卫星原子钟特性和空间复杂环境,以及组合钟差预测模型特点,可以得到以下结论:

①卫星原子钟频率高,极易受复杂的空间环境因素影响,输出的钟差序列非平稳变化,单一的钟差预测模型对钟差预测有一定的局限性;

②将卫星钟差序列小波分解为趋势项和细节项,趋势项适合用灰色预测模型 $GM(1,1)$ 单独预测,细节项呈现非线性特性,运用混沌时间序列一阶加权局域预测法预测,将两者预测结果相加,提高了使用单一灰色预测模型预测钟差的精度;

③灰色预测模型 $GM(1,1)$ 至少用 4 个数据就可以实验预测,但 $GM(1,1)$ 预测模型的精度与选取原始数据点个数有关系,本次实验选取了 10 个数据量进行预测,带有一定的片面性;

④根据分解重构后的钟差序列分量变化特征,结合单一钟差预测模型各自优势,将单一卫星钟差预测模型组合后用于非线性卫星钟差序列的预测中,可以提高钟差预测精度.

参考文献

[1] 蔚保国,鲍亚川,魏海涛.面向时间同步业务的空间信息网络拓扑聚合图模型[J].电子与信息学报,2017,39(12):2929-2936.
YU Bao-guo,BAO Ya-chuan,WEI Hai-tao. Time synchronization service oriented topology aggregation model of space information network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39 (12): 2929 - 2936. (in Chinese)

[2] 伍贻威,朱祥维,龚航,等.建立GNSS时间基准的构想和思考[J].电子学报,2017,45(8):1818-1826.
WU Yi-wei,ZHU Xiang-wei,GONG Hang, et al. Concepts and thoughts of forming a GNSS time scale[J]. Acta Electronica Sinica,2017,45(8):1818-1826. (in Chinese)

[3] 伍贻威,龚航,朱祥维,等.原子钟两级驾驭算法及在建立GNSS时间基准中的应用[J].电子学报,2016,44(7):1742-1750.
WU Yi-wei,GONG Hang,ZHU Xiang-wei, et al. Twice atomic clock steering algorithm and its application in forming a GNSS time reference[J]. Acta Electronica Sinica, 2016,44(7):1742-1750. (in Chinese)

[4] 张杰.卫星钟性能分析及钟差预报[D].西安:西安电子科技大学,2013.
ZHANG Jie. Satellite Clock Performance Analysis and the Offset Forecast[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)

[5] 付文举. GNSS在轨卫星钟特性分析及钟差预报研究[D].西安:长安大学,2014.
FU Wen-ju. Research on Prediction and Characteristics of GNSS Satellite Clock on Orbit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)

[6] 郑作亚,卢秀山.几种GPS卫星钟差预报方法比较及精度分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2008,27(4):6-11.
ZHENG Zuo-Ya,LU Xiu-Shan. Comparison and precision analysis of several GPS satellite clock bias prediction methods[J]. Journal of Shandong University of Science of Technology (Natural Science), 2008, 27(4):6-11. (in Chinese)

[7] 刘建成,杨睿峰,徐赞,等.基于Kalman滤波器的卫星钟差预报精度分析[J].全球定位系统,2012,37(4):1-5.
LIU Jian-cheng,YANG Rui-feng,XU Yun, et al. Precision analysis of satellite clock offset prediction based on Kalman filter[J]. GNSS World of China, 2012, 37(4):1-5. (in Chinese)

[8] 张景元.基于神经网络的卫星钟差预报研究[J].计算机工程与设计,2014,35(9):3254-3257.
ZHANG Jing-yuan. Research of satellite clock error prediction based on neural networks[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(9):3254-3257. (in Chinese)

[9] 王继刚,胡永辉,何在民,等.组合模型预报导航卫星钟差[J].大地测量与地球动力学,2012,32(1):84-88.
WANG Ji-gang,HU Youg-hui,HE Zai-min, et al. Combination models for navigation satellite clock prediction[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(1):84-88. (in Chinese)

[10] 郭承军,滕云龙.基于小波分析和神经网络的卫星钟差预报性能分析[J].天文学报,2010,51(4):395-403.

- GUO Cheng-jun, TENG Yun-long. Performance analysis of satellite clock bias based on wavelet analysis and neural network[J]. Acta Astronomica Sinica, 2010, 51(4): 395-403. (in Chinese)
- [11] 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 Yun-long, SHI Yi-bing, GUO Cheng-jun. Research on RAIM augmented with clock bias prediction model based on grey theory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(3): 257-262. (in Chinese)
- [12] 雷雨, 赵丹宁. 基于灰色模型和最小二乘支持向量机的卫星钟差预报[J]. 天文研究与技术, 2014, 11(1): 39-45.
LEI Yu, ZHAO Dan-ning. Prediction of satellite clock errors with a combination of the gray model and the least-squares support vector machines[J]. Astronomical Research and Technology, 2014, 11(1): 39-45. (in Chinese)
- [13] 孟凡芹. 基于星地双向时间比对的卫星钟差确定方法[D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2013.
MENG-Fan-qin. Method for Determining Satellite Clock Offset Based on Two-way Time Transfer Between Satellite and Ground[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (National Time Service Center), 2013. (in Chinese)
- [14] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
GE Zhe-xue, SHA Wei. Wavelet Analysis Theory and Realization of MATLAB R2007[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [15] 赵建忠, 徐廷学, 李海军, 叶文. 基于小波分析的导弹装备备件需求组合预测[J]. 电子学报, 2014, 42(3): 417-423.
ZHAO Jian-zhong, XU Ting-xue, LI Hai-jun, YE Wen. Combination forecasting of missile equipment space parts demand based on wavelet analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(3): 417-423. (in Chinese)
- [16] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
DENG Ju-long. Basic Method of Grey System[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1987. (in Chinese)
- [17] 李玮, 程鹏飞, 秘金钟. 灰色系统模型在卫星钟差短期预报中的应用[J]. 测绘通报, 2009, (6): 32-35.
LI Wei, CHENG Peng-fei, BI Jin-zhong. Application of grey system model in short time prediction for satellite clock error[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009, (6): 32-35. (in Chinese)
- [18] KIM H S, EYKHLT R, SSLAS J D. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows[J]. Physica D, 1999, 127(1-2): 48-60.
- [19] 李松, 刘力军. 混沌时间序列智能预测方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LI Song, LIU Li-jun. Intelligent Forecasting of Chaotic Time Series and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [20] 周金勇. 混沌时间序列预测模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
ZHOU Jin-yong. Research on Predictive Model of Chaotic Time Series[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)

作者简介



黄飞江 男, 1972 年 9 月出生, 湖南汝城人. 2003 年和 2009 年分别在广西师范大学和中国科学院研究生院获工学硕士学位和理学博士学位. 现为长沙学院教授, 主要研究方向为时间同步、卫星导航和星间链路.
E-mail: ccsuhfj@163.com



陈演羽 男, 1988 年 11 月出生, 广西梧州人. 2014 年于天津商业大学获得工学学士学位. 现为广西师范大学电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航与钟差预测.
E-mail: chyy966@126.com



李廷会 (通信作者) 男, 1971 年 6 月出生, 广西靖西人. 1994 年、2003 年和 2011 年分别在广西师范大学获理学学士学位、工学硕士学位和南京大学获工学博士学位. 现为广西师范大学教授, 主要研究方向为智能信息处理.
E-mail: tinghui@gxnu.edu.cn