

DOI:10.13203/j.whugis20160101



文章编号:1671-8860(2018)06-0854-06

利用自适应 TS-IPSO 优化的灰色系统预报卫星钟差

李成龙¹ 陈西宏¹ 刘继业¹ 吴文溢¹ 刘 赞¹

¹ 空军工程大学防空反导学院,陕西 西安,710051

摘要:在传统灰色系统预报模型的基础上,提出了一种自适应双子群改进粒子群算法(improved particle swarm optimization algorithm by two subgroups, TS-IPSO)和灰色系统相结合的预报模型。首先对钟差序列进行平滑性检验,对不满足平滑条件的序列作对数平滑处理;然后对灰色系统模型进行优化,为避免粒子群算法陷入局部最优,建立了主辅子群协同进化,惯性权重非线性递减机制。通过 TS-IPSO 优化发展灰数和内生控制灰数,增强了灰色系统模型的泛化能力。选取来自 4 种不同钟型的卫星钟差数据进行计算分析。结果表明,模型对 6 h 和 24 h 的预报精度和稳定性均优于传统模型,特别是对短期稳定性较差的铯钟,实现了 6 h 预报误差小于 1.60 ns,24 h 预报误差小于 5.71 ns。

关键词:钟差;改进粒子群;灰色系统;预报;平滑处理

中图分类号:P228

文献标志码:A

卫星钟差是精密定位、导航和授时的主要误差源之一。目前,IGS(International GNSS Service)在综合其数据分析中心提供的事后精密卫星钟差的基础上生成的最终精密卫星钟差产品,精度小于 0.1 ns^[1],能够实现厘米级的精密单点定位(precise point positioning, PPP),但该产品的获取有 13 d 的滞后,不能满足用户对实时性的要求^[2]。因此,获得精度高、实时性好的卫星钟差数据对实现 PPP 极其重要。当前主要的方法是通过 IGS 发布的超快速星历产品或快速星历产品进行预测,以获得所需时长的钟差数据。为不断提高钟差预报的精度,学者们对预报模型进行了大量研究,常见的有灰色系统模型、泛函网络模型、多项式模型、神经网络模型、最小二乘支持向量机模型、Kalman 滤波模型及相关组合模型^[3-10]。

考虑到星载原子钟的极其敏感性,容易受到自身老化、钟漂及外界因素的影响,文献[3]最早将灰色系统引入钟差预报,提出将钟差变化看作一个灰色系统,并建立了灰色预报模型,获得了较高的预测精度,但该模型对短期稳定性较差的铯钟预报精度不高。为提高灰色系统的泛化能力,文献[11]分析了灰参数对灰色系统预报精度的影响,提出通过微调灰参数来改善灰色系统,但对于

不同变化趋势的钟差序列,文章没有给出有效的参数优化方法;文献[12]提出对于不同的钟差序列,可以通过设置合适的指数因子来改进灰色系统,提高预报精度,但对如何获得最优指数因子未做进一步研究。另外,灰色系统的预报精度除了受限于模型本身参数的选择,还与原始数据的平滑性有关。文献[13]提出了一种基于含参二次对数函数变换的方法对原始数据进行平滑处理,提高了模型的预测精度。

本文提出了一种自适应双子群改进粒子群算法(improved particle swarm optimization algorithm by two subgroups, TS-IPSO)与灰色系统结合的预报方法。首先对钟差序列进行平滑性检验,对非平滑序列通过对数变换提高钟差数据的平滑度;再用搜索范围广、收敛速度快、寻优精度高的双子群改进粒子群算法优化发展灰数和内生控制灰数,改进了传统的灰色系统模型,并用 IGS 实测数据验证了算法的有效性。特别是对短期稳定性较差的铯钟,预报精度有较大的提升。

1 钟差预报模型

1.1 GM(1,1)模型和数据平滑处理

星载原子钟受自身特性和环境的影响,稳定

收稿日期:2016-05-08

项目资助:国家自然科学基金(61701525, 61671468)。

第一作者:李成龙,硕士生,主要从事高精度同步技术方法研究。cl_li1994@163.com

性差异较大,存在钟差序列非线性较强的情况。而灰色系统模型的预报精度很大程度上取决于序列的平滑特性,平滑性越好,预报精度就越高^[13]。设原始钟差序列为: $x^0 = \{x^0(1), x^0(2) \dots x^0(n)\}$ 。记 $\rho(i) = \frac{x^{(0)}(i)}{\sum_{j=1}^{i-1} x^{(0)}(j)}$ 为序列 x^0 的平滑度,若 $\rho(i)$ 满足:

$$\begin{cases} \frac{\rho(i+1)}{\rho(i)} < 1, i = 2, 3 \dots n-1 \\ 0 < \rho(i) < 0.5, i = 3, 4 \dots n-1 \end{cases} \quad (1)$$

则称 x^0 为准平滑序列。

钟差建模前,先对钟差序列 x^0 进行平滑检验。若需进行平滑处理,则通过对钟差序列 x^0 作二次对数函数变换,即令 $y^0(i) = \ln [c(x^0(i))^2 + d]$, $i = 1, 2 \dots n$; 然后将 y^0 进行一次累加,建立离散模型,再进行一次累减,得到 y^0 的预测模型如下:

$$y^0(i) = \begin{cases} y^0(1), i = 1 \\ e^{-a(i-1)} \left[y^0(1) - \frac{u}{a} \right] (1 - e^a), i \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, a 为发展灰数; u 为内生控制灰数。最后按照二次对数变换函数进行逆处理,便可得到序列 x^0 的预测模型。

1.2 TS-IPSO 优化 GM(1,1)

在式(2)的 GM(1,1)模型中, a 反映预测序列的发展态势, u 的大小则代表数据序列的变化关系^[11]。针对不同钟差序列的数据变化趋势,找到各自适应的参数 a 和 u ,即通过对参数 a 和 u 进行寻优,能使预测模型得到改进,从而获得更高的预测精度。

标准粒子群算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO) 作为一种高效的全局寻优群体智能算法,广泛运用于数据挖掘、函数优化和模式识别等领域。但同时存在着两个问题:①随着算法的深入,容易陷入局部极值而早熟;②惯性权重取值不当,严重影响算法收敛寻优效果。

TS-IPSO 算法是 PSO 的一种改进算法,具体是将初始化后的粒子群均分为两个相互独立的子群^[14]。其中一个子群为主子群,迭代搜寻方式与标准 PSO 相同:

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + \eta_1 \text{rand} \cdot (p_{id} - x_{id}(t)) + \eta_2 \text{rand} \cdot (p_{gd} - x_{id}(t)) \quad (3)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (4)$$

式中, $v_{id}(t+1)$ 和 $x_{id}(t+1)$ 分别表示第 i 个粒子在第 $t+1$ 次迭代时第 d 维上的速度和位置; ω 为

惯性权重; η_1 和 η_2 表示速度调节参数(一般取 2); p_{id} 为第 i 个粒子的位置最优解; p_{gd} 表示粒子群的位置最优解。

另一个子群为辅子群,搜寻方向与主子群相反:

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) - v_{id}(t+1) \quad (5)$$

主辅子群每次迭代完成后,比较这两个子群的局部最优适应值,用局部适应值更优的子群粒子代替较差的粒子,并作为主辅子群共同的局部最优。同样,将全局适应值更优的粒子作为主辅子群共同的全局最优。

惯性权重 ω 对算法的收敛性有着重要影响,较大的权重有利于提高算法的全局搜索能力,而较小的权重能够增强算法的局部搜索能力。为了找到能在全局搜索和局部搜索之间取得最佳平衡的惯性权重更迭机制,文献[15]指出对于连续优化问题,凹曲线递减策略优于线性递减策略,并提出了一种自适应调节惯性权重的方法:

$$\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min})(t/t_{\max})^2 + (\omega_{\min} - \omega_{\max}) \cdot (2t/t_{\max}) + \omega_{\max} \quad (6)$$

式中, ω_{\max} 为最大权重; ω_{\min} 为最小权重; t_{\max} 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数。在早期, ω 递减速度加快,能快速进入局部搜索,增强了局部搜索能力;在后期, ω 递减速度放缓,保证了全局搜索能力,有效地避免早熟,提高了后期收敛精度。

1.3 算法流程

本文模型首先对原始钟差数据进行平滑性检验和平滑处理;接着对灰参数寻优,在不增加粒子规模的情形下,主辅子群相互协同配合,加快了搜寻速度。对惯性权重引入自适应非线性递减机制,使得算法不易陷入局部最优而早熟,提高了算法精度。算法流程如图 1 所示,具体步骤如下。

1) 数据预处理。按照式(1)对原始钟差数据进行平滑性检验,对平滑性差的序列作二次对数变换,在此选定为最常用的变换形式,即取 $c = 1$, $d = 0$ 。

2) 利用处理后的数据得到 GM(1,1)的微分方程。将发展灰数 a 和内生控制灰数 u 作为待优化的参数,使用 TS-IPSO 迭代寻优。

3) 随机初始化粒子群,包括粒子的位置和速度,然后将粒子群均分为两个子群。主辅子群按照式(3)更新速度,按照式(4)、式(5)分别更新位置。惯性权重 ω 按照式(6)进行迭代更新。

4) 根据原始钟差和预测值构建适应值函数:

$$f = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

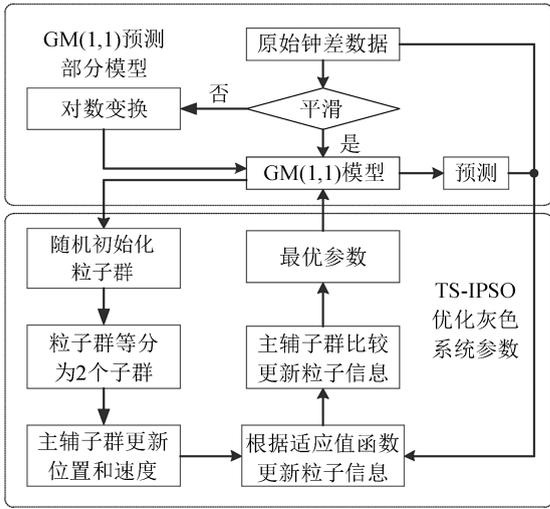


图1 改进模型的算法流程

Fig.1 Flow Chart of the Improved Model

式中, x_i 是原始钟差数据; \hat{x}_i 是预测数据。主辅子群分别计算更新个体最优和全局最优。比较主辅子群相应的个体最优位置和全局最优位置, 将更优者作为两个子群共同的最优极值, 进入下一步迭代。

5) 检查 TS-IPSO 算法是否满足终止条件。若是, 则求出最优解; 否则转向步骤 3), 继续更新。迭代完成后, 将最优解代入式(2), 获得优化模型, 最后按照二次对数变换函数进行逆处理, 得到最终的预测模型。

2 算例与分析

为了验证本文提出的 TS-IPSO 改进灰色系统预测模型的有效性, 采用 IGS 发布的 2012-06-10—2012-06-12 的间隔时长为 15 min 的精密卫星钟差数据进行仿真分析。该时段内星载原子钟主要有下面 4 类钟型^[16]: BLOCK IIA Rb、BLOCK IIR-M Rb、BLOCK IIR Rb 及 BLOCK IIA Cs。对每类原子钟随机地选取一颗卫星的钟差数据进行分析, 具体如表 1 所示。鉴于北斗系统的星载钟型与 GPS 基本一致, 因此本文模型同样适用于北斗系统^[17]。

表 1 不同星载钟型与所选卫星对应关系

Tab.1 Selected Satellites Correspond to 4 Different Clocks

星载钟型	BLOCK II	BLOCK II	BLOCK II	BLOCK II
	A Rb	R-M Rb	R Rb	A Cs
卫星编号	PRN01	PRN07	PRN19	PRN03

IGS 发布的超快速星历产品的更新时间约为 6 h, 而快速星历产品的更新时间约为 24 h。鉴于此, 本文利用所得数据分别进行了 6 h 和 24 h 的钟差预报, 并与二次多项式模型(quadratic polynomial, QP)和灰色系统模型(grey model, GM)进行比较分析, 预报误差对比如图 2 和图 3 所示。

以 IGS 精密钟差值为标准, 采用统计量均值误差(mean errors, MEs)、均方根误差(rootmean

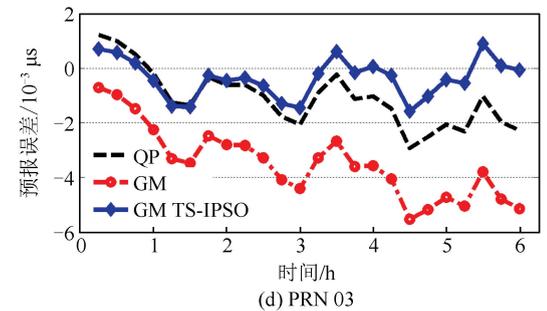
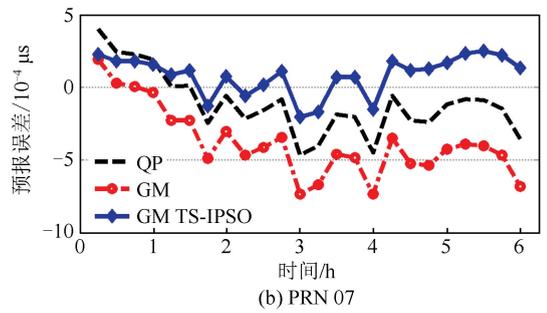
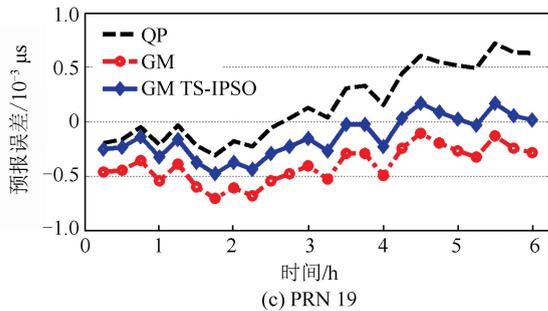
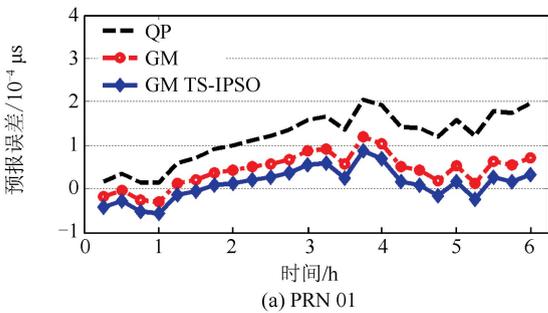


图 2 6 h 预报误差对比

Fig.2 Comparison of Errors in 6-hour Prediction

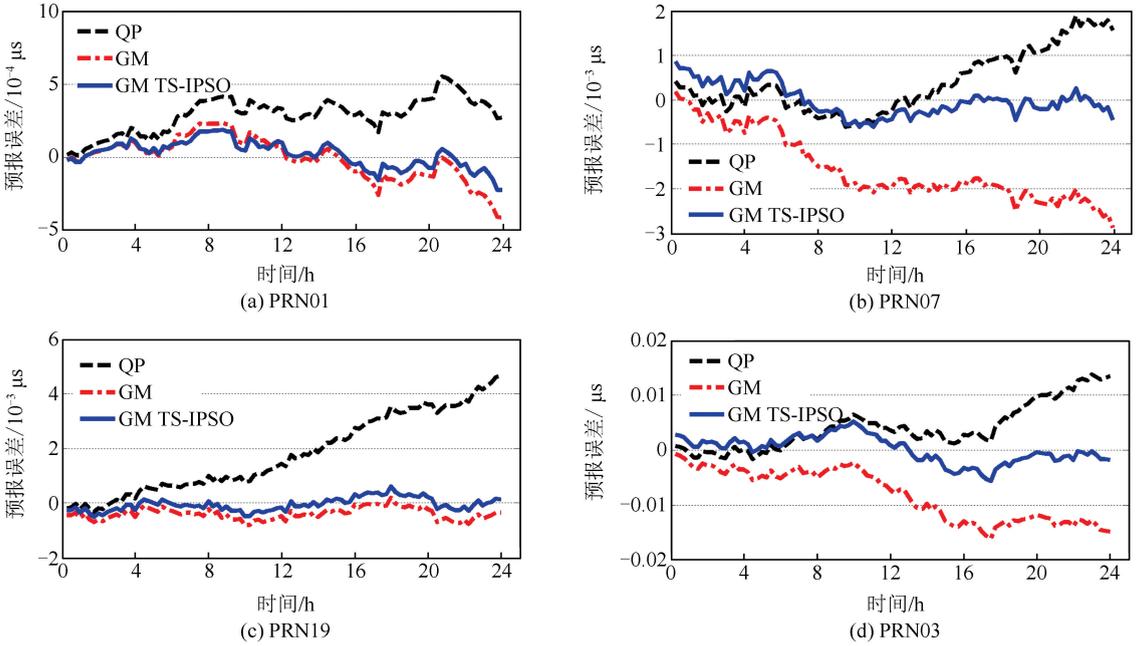


图 3 24 h 预报误差对比

Fig.3 Comparison of Error in 24-hour Prediction

square errors, RMSEs) 和最大误差 E_{max} 比较分析 QP、GM 和本文改进模型对卫星钟差 6 h 和 24 h 的预报精度及其稳定性。均值误差 MEs、均

方根误差 RMSEs 和最大误差 E_{max} 对比情况如表 2 和表 3 所示。通过对比分析结果,可以得出以下结论。

表 2 不同星载钟型 6 h 预报精度对比/ns

Tab.2 Comparison of 6-hour Prediction Precise among Different Satellite Clocks/ns

卫星 编号	二次多项式(QP)			灰色模型(GM)			改进模型(GM TS-IPSO)		
	E_{max}	MEs	RMSEs	E_{max}	MEs	RMSEs	E_{max}	MEs	RMSEs
PRN01	0.204 61	0.051 69	0.073 73	0.120 43	0.036 97	0.045 73	0.087 28	0.031 82	0.041 40
PRN07	0.468 47	0.162 02	0.192 72	0.736 20	0.230 96	0.288 54	0.248 36	0.124 96	0.136 78
PRN19	0.719 61	0.204 23	0.266 75	0.707 63	0.246 95	0.306 08	0.474 90	0.198 96	0.263 03
PRN03	2.941 38	1.622 11	1.966 23	5.550 04	2.008 65	2.444 88	1.594 45	1.300 18	1.533 92

表 3 不同星载钟型 24 h 预报精度对比/ns

Tab.3 Comparison of 24-hour Prediction Precise among Different Satellite Clocks/ns

卫星 编号	二次多项式(QP)			灰色模型(GM)			改进模型(GM TS-IPSO)		
	E_{max}	MEs	RMSEs	E_{max}	MEs	RMSEs	E_{max}	MEs	RMSEs
PRN01	0.552 19	0.178 56	0.239 31	0.411 98	0.079 50	0.113 49	0.243 02	0.079 945	0.107 19
PRN07	1.894 26	0.400 62	0.612 03	2.867 26	0.962 39	1.310 25	0.864 35	0.319 07	0.389 81
PRN19	4.670 07	1.122 85	1.750 14	0.802 24	0.313 77	0.376 56	0.616 92	0.199 77	0.253 53
PRN03	13.694 00	3.153 43	4.580 55	16.099 62	5.311 71	7.201 76	5.703 22	2.048 97	2.601 07

1) 6 h 短期预报: 本文模型对星载铷钟 (BLOCK IIA Rb, BLOCK IIR-M Rb 和 BLOCK IIR Rb) 的预报误差均小于 0.48 ns, 优于 GM 和 QP 模型。对于短期稳定性较差的铯钟 (BLOCK IIA Cs), 预报误差小于 1.60 ns, 明显优于 GM 和 QP 模型。

2) 24 h 预报: 本文模型对星载铷钟 (BLOCK IIA Rb, BLOCK IIR-M Rb 和 BLOCK IIR Rb) 的预报误差同样处于亚纳秒量级, 且精度高于

GM 和 QP 模型; 对星载铯钟 (BLOCK IIA Cs) 的预报误差不超过 5.71 ns, 相对于传统模型具有较大优势。

3) 表格对比结果表明, 本文提出的改进灰色系统预测模型, 在 6 h 和 24 h 的预报中, MEs、RMSEs 和 E_{max} 均小于 QP 和 GM 模型, 具有较高的预报稳定性。

4) 从星载原子钟的钟型方面分析, 本文模型对铷钟 (PRN01、PRN07 和 PRN19) 的预报精度

总体上要好于铯钟(PRN03)。在6 h和24 h的预报中,铷钟的MEs和RMSEs均处于亚纳秒量级。6 h预报中,铯钟的MEs和RMSEs分别约为1.30 ns和1.53 ns;24 h预报中,铯钟的MEs和RMSEs则分别约为2.05 ns和2.60 ns。可以知道,铷钟的6 h和24 h预报稳定性总体上要优于铯钟,这是由于铯钟的短期稳定性较差造成的。而短期稳定性是精密单点定位的主要决定因素,钟差、钟速和钟漂的变化影响很小,因此,对于短期钟差预报,铷钟具有较大的优势。

3 结 语

本文提出的自适应TS-IPSO优化灰色系统钟差预报模型,先进行平滑性检验,对非平滑序列作平滑处理,再通过TS-IPSO算法优化传统灰色系统的发展灰数 a 和内生控制灰数 u ,使灰色模型在不同钟型的预报精度上均得到提高。在6 h预报中,星载铷钟的预报误差小于0.48 ns,星载铯钟的预报误差小于1.60 ns;在24 h预报中,星载铷钟的预报误差小于0.87 ns,星载铯钟的预报误差小于5.71 ns,能够满足精密单点定位对钟差精度的要求。此外,该模型相对于传统二次多项式模型和灰色系统模型具有更高的预报稳定性。整个预报过程均在1 min内完成,结果验证了该模型的可行性和时效性,为钟差预报提供了一个新的方案。

参 考 文 献

- [1] Lou Yidong, Shi Chuang, Zhou Xiaoqing, et al. Realization and Analysis of GPS Precise Clock Products [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 88-91(楼益栋, 施闯, 周小青, 等. GPS精密卫星钟差估计与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 88-91)
- [2] Tao Tingye, Gao Fei, Li Xiaoli. One Prediction Method for High-precision GPS Satellite Clock Error [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2013, 33(4): 71-75(陶庭叶, 高飞, 李晓莉. 一种高精度GPS卫星钟差预报方法[J]. 中国空间科学技术, 2013, 33(4): 71-75)
- [3] Cui Xianqiang, Jiao Wenhai. Grey System Model for the Satellite Clock Error Predicting [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 447-450(崔先强, 焦文海. 灰色系统模型在卫星钟差预报中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(5): 447-450)
- [4] Xu Bo, Wang Ying, Yang Xuhai. Navigation Satellite Clock Error Prediction Based on Functional Network [J]. *Neural Process Letter*, 2013, 38: 305-320
- [5] Huang Wenguan, Zhang Qin, Xu Guochang. Real-time Clock Offset Prediction with an Improved Model [J]. *GPS Solution*, 2014, 18(1): 95-104
- [6] Guo Chengjun, Teng Yunlong. Application of Neural Network in Satellite Clock Bias Short-term Prediction [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(4): 198-200(郭承军, 滕云龙. 神经网络在卫星钟差短期预报中的应用研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(4): 198-200)
- [7] Wang Guocheng, Liu Lintao, Xu Aigong, et al. The Application of Radial Basis Function Neural Network in the GPS Satellite Clock Bias Prediction [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(8): 803-807(王国成, 柳林涛, 徐爱功, 等. 径向基函数神经网络在GPS卫星钟差预报中的应用[J]. 测绘学报, 2014, 43(8): 803-807)
- [8] Wang Yupu, Lv Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. A New Data Preprocessing Method for Satellite Clock Bias and Its Application in WNN to Predict Medium-term and Long-term Clock Bias [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(3): 373-379(王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 一种新的钟差预处理方法及在WNN钟差中长期预报中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(3): 373-379)
- [9] Lei Yu, Zhao Danning, Li Bian, 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(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)
- [10] Guo Hairong, Yang Yuanxi, He Haibo, et al. Determination of Covariance Matrix of Kalman Filter Used for Time Prediction of Atomic Clocks of Navigation Satellites [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 146-150(郭海荣, 杨元喜, 何海波, 等. 导航卫星原子钟Kalman滤波中噪声方差-协方差的确定[J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 146-150)
- [11] Lu Xiaofeng, Yang Zhiqiang, Jia Xiaolin, et al. Parameter Optimization Method of Grey System Theory for the Satellite Clock Error Predicting [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(5): 492-495(路晓峰, 杨志强, 贾小林, 等. 灰色系统理论的优化方法及其在卫星

- 钟差预报中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(5): 492-495)
- [12] Zhang Zuoya, Chen Yongqi, Lu Xiushan. An Improved Grey Model and Its Application Research on the Prediction of Real-time GPS Satellite Clock Errors [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2009, 33: 72-89
- [13] Ming Zutao, Liu Jun, Xia Li, et al. Study of the Implementation of Improved Grey Model in High-speed Railway Settlement Prediction [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(4): 137-140 (明祖涛, 刘军, 夏力, 等. 改进的灰色模型在高铁沉降预测中的应用[J]. 测绘科学, 2015, 40(4): 137-140)
- [14] Zhang Yingjie, Li Liang, Zhang Yinghao, et al. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Two Sub-population [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38(1): 84-88(张英杰, 李亮, 张英豪, 等. 一种基于双子群的改进粒子群优化算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(1): 84-88)
- [15] Chen Guimin, Jia Jianyuan, Han Qi. Study on the Strategy of Decreasing Inertia Weight in Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(1): 53-56 (陈贵敏, 贾建援, 韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 53-56)
- [16] Jia Xiaolin, Feng Laiping, Mao Yue, et al. Performance Evaluation of GPS On-board Clock [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2010, 33(2): 115-120(贾小林, 冯来平, 毛悦, 等. GPS 星载原子钟性能评估[J]. 时间频率学报, 2010, 33(2): 115-120)
- [17] Tang Guifen, Xu Xueqing, Cao Jidong, et al. Precision Analysis for Compass Satellite Clock Prediction Based on a Universal Clock Offset Model [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 2015, 45(7): 0795021-0795026(唐桂芬, 许雪晴, 曹纪东, 等. 基于通用钟差模型的北斗卫星钟预报精度分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2015, 45(7): 079502-1-079502-6)

Predicting Satellite Clock Errors Using Grey Model Optimized by Adaptive TS-IPSO

LI Chenglong¹ CHEN Xihong¹ LIU Jiye¹ WU Wenyi¹ LIU Zan¹

¹ Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract: This paper proposes a combination prediction model based on improved particle swarm optimization algorithm by two subgroups (TS-IPSO) and grey model. We check the smoothness of clock bias sequence, and log it if the smoothness is not satisfied. To avoid getting stuck at local optimization and turning premature convergence, we established a mechanism so that the main particle swarm and assistant swarm search synergistically, so the inertia weight decreases nonlinearly. We use TS-IPSO to optimize development obscure number and endogenous control obscure number, thus the improved grey model can adapt and gain higher precision. Satellite data from four different clocks are selected and calculated, the results show that the improved model is superior to the conventional model, in precision and stability, for 6-hour and 24-hour prediction. Especially, in the Cs clock, it achieves 6-hour prediction errors of less than 1.60 ns, and 24-hour prediction errors of less than 5.71 ns.

Key words: clock error; improved particle swarm algorithm; grey model; prediction; smoothing

First author: LI Chenglong, postgraduate, specializes in the methods of high precise synchronization. E-mail: cl_li1994@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 61701525, 61671468.