北斗卫星导航系统数据分析与应用专题·论文

基于通用钟差模型的北斗卫星钟预报精度分析

唐桂芬^{①②*}, 许雪晴^②, 曹纪东^①, 刘晓萍^①, 王群仰^③

① 北京卫星导航中心, 北京 100094;

② 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

③ 航天恒星科技有限公司, 北京 100084

*联系人, E-mail: guifentang@nudt.edu.cn

收稿日期: 2015-03-30; 接受日期: 2015-04-23; 网络出版日期: 2015-05-29

中国航天科技集团公司卫星应用研究院创新基金(编号: 2014_CXJJ-DH_15)和上海市空间导航与定位技术重点实验室基金(编号: 12DZ2273300)资助项目

摘要 卫星钟差参数的预报精度直接影响卫星导航系统的服务性能. 影响卫星钟预报精度的因素有很多, 其中钟差序列的建模质量是一个很重要的影响因子, 只有最能反映星载原子钟自身物理特性和运行状态的模型才能获得更高的卫星钟预报精度. 本文分析了北斗系统钟差序列的特性, 提出了一种通用的钟差模型, 该模型同时包含线性项、周期项和随机项, 并且利用了 AR 模型对随机项进行建模, 给出了周期项和 AR 模型参数的确定方法, 该模型还能够根据实际星载钟特性进行退化与扩展. 本文还给出了基于该模型的卫星钟预报方法, 最后利用北斗实测数据进行了卫星钟预报精度分析试验, 试验结果表明: 所提出的通用模型能够最大限度地拟合钟差序列, 从而大大提高卫星钟的预报精度, 特别是针对一些稳定性较差的星载钟, 实现了 6 h 预报精度 2 ns, 12 h 预报精度 5.5 ns.

关键词 卫星导航, 在轨卫星钟, 钟差预报

PACS: 06.20.Dk, 06.30.Ft, 91.10.By, 91.10.Fc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00121

1 引言

卫星钟差参数的预报精度直接影响卫星导航系统的服务性能, 影响卫星钟预报精度的影响因子有很多, 具体包括: 原子钟自身的物理性能、预报模型、数据采样精度、数据采样长度和数据采样频度等. 其中最重要的影响因素是原子钟自身的物理性能, 高性能的星载原子钟为高精度卫星钟预报提供了良好的物理基础. 但是作为一种精密的设备仪器, 任何微

小的环境变化均有可能改变星载原子钟的物理特性, 进而使卫星钟预报精度下降. 预报模型的质量则是另一个非常重要的影响因子, 只有最能反映星载原子钟自身物理特性和运行状态的模型才能获得更高的卫星钟预报精度.

图 1 和 2 分别给出了 GPS 系统和北斗卫星导航(BD)系统所有在轨卫星约 50 h 的钟差拟合残差序列. 比较这两幅图不难发现: 一方面, BD 系统原子钟性能整体上较 GPS 系统稍差; 另一方面, 几乎所有卫星

引用格式: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 079502

Tang G F, Xu X Q, Cao J D, et al. Precision analysis for Compass satellite clock prediction based on a universal clock offset model (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 079502, doi: 10.1360/SSPMA2015-00121

的二次残差序列均表现出不同幅度的周期特性, 同时系统内星载原子钟的性能差异也较大, 在分析时段内, GPS 系统 G08, G06, G25, BD 系统 G6, I3 稳定度较差. 对于这些稳定性较差的原子钟采用经典的二次项钟差模型进行预报, 预报精度不能满足导航系统对卫星钟预报精度指标要求. 其他稳定度较高的原子钟, 利用简单模型, 甚至是一阶线性模型即能获得较高的预报精度.

图 1 (网络版彩图)GPS 在轨卫星钟差拟合残差序列

Figure 1 (Color online) Linear fitting error for GPS onboard Satellite.

图 2 (网络版彩图)BD 在轨卫星钟差拟合残差序列

Figure 2 (Color online) Linear fitting error for BDS onboard Satellite.

基于已有的原子钟水平, 为了提升卫星预报精度, 国内外学者做了大量的研究工作, 提出了多种卫星钟预报模型和方法, 常见的卫星钟预报模型有: 二次多项式模型、线性以及周期函数模型、灰色模型、自回归模型、人工神经网络模型、卡尔曼滤波模型和其他一些预报方法^[3-7]. 二次多项式模型基本能反映卫星钟自身的物理特性, 但是钟差比对序列中往往含有其他误差项, 这些误差导致二次多项式模型预报误差变大. 郑作亚等人^[2]利用线性与周期性模型对含有某些周期项的钟差序列进行建模和预报, 获得了较高的预报精度, 其他模型大都希望通过对随机项进行建模, 提高预报精度. 事实上它们大多适应于某种特性的卫星钟或特定的观测序列. 郭海荣^[4]分析了 GPS 星载原子钟噪声频谱特性, 以期利用幂律谱噪声模型来刻画不同类型的原子钟, 并在卫星钟预报时对这些物理特性加以考虑. 其研究具有一定深度, 但是现实中星载原子钟噪声特性很复杂、并且在整个生命周期中噪声特性会发生变化, 因此, 这方面的研究成果很难与钟差预报的具体实际相结合.

为了提升卫星钟的预报精度, 同时兼顾运算的复杂度, 基于对上述预报方法的比较分析, 借鉴各自的优点, 结合 BD 卫星钟自身的特性, 论文提出一种通用卫星钟差模型, 给出了模型参数的确定方法以及实现步骤, 并利用实测数据进行了实验分析. 验证了论文所提出方法的正确性与有效性.

2 通用的卫星钟差预报模型

考虑到钟速和钟漂是星载原子钟特别是星载铷钟的基本物理特性, 因此, 本文以二次多项式模型作为基础模型, 结合在轨卫星钟的特性, 重点研究周期项和随机项的建模方法.

为了建立通用卫星钟差模型, 本文对 BD 系统多颗在轨卫星的钟差序列进行了分析试验, 所采用的数据的观测时段为: 2013 年 07 月 01 日–2013 年 07 月 15 日, 共 15 天, 选择了 3 颗不同类别的卫星, 其中 G1, I3 和 M6 分别为 GEO, IGSO 和 MEO 卫星. 图 3 给出了这 3 颗卫星的钟差序列图, 图 4 和 5 分别给出了图 3 钟差的一阶线性拟合残差序列和二阶多项式拟合残差序列.

由图 4 和 5 不难发现, 扣除二阶多项式以后, 残差已经非常小了, 但是残差结果特别是二次多项

图 3 (网络版彩图)BD 系统 G1, I3, M6 卫星钟差序列

Figure 3 (Color online) Clock offset sequence for BDS G1, I3, M6 Satellite.

式拟合残差结果还存在明显的周期项, 包括 7 天左右的大周期和 1 天左右的小周期, 因此, 周期项在卫星钟差建模中也是必须要考虑的因素. 基于此, 卫星钟差序列的通用模型可以表达为

$$Y_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \sum_{k=1}^m (A_k s \cos(w_k t) + B_k \sin(w_k t)) + \varepsilon, \quad (1)$$

其中 Y_t 为原始钟差, t 为观测历元, a_0 为常数项, a_1 和 a_2 为线性项系数, A_k 和 B_k 为振幅、 w_k 为频率, ε 为随机误差.

基于通用模型的卫星钟差预报方法与步骤具体如下:

(1) 利用二次多项式拟合从原始钟差序列中分离线性项

$$v_{1t} = Y_t - a_0 - a_1 t - a_2 t^2, \quad (2)$$

其中 a_0 , a_1 和 a_2 可通过最小二乘法确定, v_{1t} 为扣除二次多项式项后的残差.

(2) 利用周期项拟合 v_{1t} , 对周期项进行建模.

图 4 (网络版彩图)BD 系统 G1, I3, M6 卫星钟差线性拟合残差

Figure 4 (Color online) Linear fitting error for BDS G1, I3, M6 Satellite.

$$v_{2t} = v_{1t} - \sum_{k=1}^m (A_k s \cos(w_k t) + B_k \sin(w_k t)), \quad (3)$$

其中 $k=1, 2, \dots, m$, m 的大小由功率谱决定, w_k 可以通过傅里叶变换进行频谱特性来确定^[1], A_k 和 B_k 则由最小二乘法来确定, v_{2t} 为扣除二次多项式项和周期项后的残差.

(3) 利用 AR 模型对剩下的残差 v_{2t} 进行建模.

设零均值平稳时间序列 Z_t , 用 P 阶 AR 模型表示

$$Z_t = \sum_{i=1}^m \phi_i Z_{t-i} + a_t; \quad (4)$$

模型阶数选取

$$\text{FPE}(M) = P_M (N + M + 1) / (N - M - 1); \quad (5)$$

最终预报误差准则

$$P_M = \frac{1}{N - M} \sum_{t=M+1}^N \left(Z_t - \sum_{j=1}^M \phi_j Z_{t-j} \right)^2; \quad (6)$$

模型参数估计, 选择系数 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M$, 使得

图 5 (网络版彩图)BD 系统 G1, I3, M6 卫星钟差二阶多项式拟合残差

Figure 5 (Color online) Quadratic fitting error for BDS G1, I3 M6 Satellite.

$$\begin{cases} Q = E[Z_t - \sum_{j=1}^p \phi_j Z_{t-j}]^2 = \min, \\ R_i - \sum_{j=1}^p \phi_j Z_{t-j} = 0, i = 1, 2, p, \end{cases} \quad (7)$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} R_0 & R_1 & \cdots & R_{p-1} \\ R_1 & R_0 & \cdots & R_{p-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{p-1} & R_{p-2} & \cdots & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \cdots \\ \phi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdots \\ R_p \end{bmatrix}. \quad (8)$$

采用 Burg 递推算法解此方程即可求得 AR 模型系数.

利用上述步骤确定的二次多项式参数、周期项参数和 AR 模型系数独立预报, 并将三者的预报值相加即为钟差预报结果, 最后还可以根据实际需要可对高精度的钟差预报序列表达为二次多项式.

该模型不仅描述了星载原子钟主要的物理特性, 同时刻画了钟差序列的数据特征, 可以认为是一种通用的钟差模型, 在特定条件下还可以进行适当的

退化和丰富, 以适应特定的星载原子钟.

3 试验分析

为了验证本文所提出的钟差模型的预报精度, 利用 BD 实测数据进行试验分析. 数据采集时段为 2013 年 3 月 1 日 0 点–2013 年 3 月 5 日 0 点, 共 96 h. 期间大多数卫星星载钟稳定度比较高, 利用简单模型和通用模型预报精度差别不大. 但是对于有些稳定度较差的星载原子钟则预报精度相差非常大.

图 6 和 7 分别给出了试验弧段内 G6 星和 I3 星的观测值序列、线性拟合值序列以及线性拟合残差序列.

表 1 给出了 G6 星和 I3 星分别利用简单一阶和二阶多项式模型, 以及不同历史数据长度的 6 h 预报误差统计结果. 表 2 给出了 G6 星和 I3 星分别利用简单一阶和二阶多项式模型, 不同历史数据长度的 12 h 预报误差统计结果.

由表 1 和 2 可知, 对于稳定性较差的原子钟简单的多项式钟差模型的预报精度是比较差的.

图 8 和 9 给出了 G6 和 I3 星利用通用预报模型进行卫星钟预报试验, 试验使用前 60 h 数据作为历史数据, 后 30 h 数据用于预报结果的检测. 图 8 为 G6 星 6 h 预报结果, 图 9 给出了 I3 星 12 h 的预报结果, 试验结果表明: 基于通用钟差模型的卫星钟预报 6 h

图 6 (网络版彩图)G6 星钟差、拟合序列和残差序列

Figure 6 (Color online) Origin, fitting and error value for G6.

图 7 (网络版彩图)I3 星钟差、拟合序列和残差序列
Figure 7 (Color online) Origin, fitting and error value for I3.

表 1 G6 和 I3 星多项式模型 6 h 预报误差结果

Table 1 6 h Prediction error I3 and G6 with polynomial fitting							
星号	预报模型	不同数据长度预报误差(ns)					
		5 h	10 h	15 h	20 h	25 h	30 h
G6	1 阶	7.4	6.7	7.2	5.6	7.9	6.5
	2 阶	7.0	8.0	6.2	7.4	6.2	7.9
I3	1 阶	7.2	6.7	8.0	7.5	5.3	7.6
	2 阶	6.4	7.1	7.6	6.5	6.9	7.1

表 2 G6 和 I3 星多项式模型 12 h 预报误差结果

Table 2 12 h Prediction error I3 and G6 with polynomial fitting							
星号	预报模型	不同数据长度预报误差(ns)					
		5 h	10 h	15 h	20 h	25 h	30 h
G6	1 阶	14.2	13.3	12.0	14.2	13.9	12.5
	2 阶	13.0	12.4	15.2	14.0	13.2	12.9
I3	1 阶	10.3	11.2	12.5	11.6	12.9	14.9
	2 阶	13.4	12.9	15.5	13.2	15.3	12.6

预报精度优于 2 ns, 12 h 预报精度优于 5.5 ns. 由此可知, 使用通用模型能大幅提高卫星钟预报精度.

4 结论

论文提出了一种通用的钟差模型, 该模型含有二次多项式项、周期项和随机项, 并对随机项采用

图 8 (网络版彩图)G6 卫星基于通用模型 6 h 预报结果
Figure 8 (Color online) 6 h Prediction error for G6 with universal model.

图 9 (网络版彩图)I3 卫星基于通用模型 12 h 预报结果
Figure 9 (Color online) 12 h Prediction error for I3 with universal model.

AR 模型进行建模, 给出了基于该模型的卫星钟差预报步骤和参数确定方法. 利用实测数据试验了该模型的预报精度, 试验结果表明: 卫星预报精度由原来的 6 h 预报精度 8 ns, 提高到 2 ns; 12 h 预报精度由原来的 15.5 ns 提高到 5.5 ns. 由此可见, 通用卫星钟差模型能有效提高卫星钟的预报精度.

参考文献

- 1 陈兆国. 时间序列及其谱分析. 北京: 科学出版社, 1988
- 2 Zheng Z Y, Dang Y M, Lu X S, et al. Prediction model with periodic item and its application to the prediction of GPS satellite clock bias (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2010, 51: 95–102 [郑作亚, 党亚民, 卢秀山, 等. 附有周期项的预报模型与其在 GPS 卫星钟差预报中的应用研究. *天文学报*, 2010, 51: 95–102]
- 3 Zhang Q H, Sui L F, Mou Z K. A GPS precise clock errors prediction model based on wavelet and arma (in Chinese). *J Geodesy Geodyn*, 2010, 30: 100–104 [张清华, 隋立芬, 牟忠凯. 基于小波与 ARMA 模型的卫星钟差预报方法. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30: 100–104]
- 4 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究. 博士学位论文. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2006
- 5 Cui X Q, Jiao W H. Gas system model for the satellite clock error predicting (in Chinese). *Geoma Inf Sci Wuhan Univ*, 2005, 30: 447–450 [崔先强, 焦文海. 灰色系统模型在钟差预报中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30: 447–450]
- 6 Dai W, Jiao W H, Li W P, et al. Research on clock error prediction for atomic clocks loaded on GPS block IIR(M) satellite clocks (in Chinese). *J Geodesy Geodyn*, 2009, 29: 111–116 [戴伟, 焦文海, 李维鹏, 等. GPS Block IIR(M) 星载原子钟钟差预报研究. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29: 111–116]
- 7 Zheng Z Y, Lu X S. Comparison and precision analysis of several GPS satellite clock bias prediction methods (in Chinese). *J Shandong Univ Sci Technol*, 2008, 27: 6–15 [郑作亚, 卢秀山. 几种 GPS 卫星钟差预报方法比较及精度分析. *山东科技大学学报自然科学版*, 2008, 27: 6–15]

Precision analysis for Compass satellite clock prediction based on a universal clock offset model

TANG GuiFen^{1,2*}, XU XueQing², CAO JiDong¹, LIU XiaoPing¹ & WANG QunYang³

¹ *Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;*

² *Shanghai Astronomical Observatory, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;*

³ *Space Star Technology Company Limited, Beijing 100084, China*

Prediction accuracy for satellite clock parameters directly affects the performance of satellite navigation systems and services. There are many factors which can affect the satellite clock prediction accuracy. The quality of modeling clock sequence is a very important influence factor. Only those which can best reflects onboard clock running and physical characteristics can obtain a higher accuracy of satellite clock prediction. This paper analyzed the characteristics of the Compass system clock offset sequence, and proposed a universal clock offset model. The model contains a linear term, periodic term and random term, while using the AR model for stochastic modeling. We also gave a method for determining the periodic terms and AR model parameters. The model we proposed is also capable of degradation and expansion according to the actual onboard clock feature. The paper also gave the satellite clock prediction method based on the model. Finally, we conducted an experimental analysis with real Compass data. The results show that the proposed universal model can greatly improve the prediction accuracy of the satellite clock, especially for some of the less stable satellite clock. We achieve 6 h prediction accuracy better than 2 ns, and 12 h prediction accuracy better than 5.5 ns.

satellite navigation, onboard satellite clock, clock prediction

PACS: 06.20.Dk, 06.30.Ft, 91.10.By, 91.10.Fc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00121