

基于最小二乘频谱分析的 GPS/GLONASS 卫星钟差特性研究^{*1}

杨赛男¹⁾ 陈俊平¹⁾ 张益泽^{1 2)} 裴 霄^{1 2)} 余 伟^{1 2)} 谢益炳^{1 2)}

(1) 中国科学院上海天文台, 上海 200030
(2) 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092)

摘 要 基于 IGS 提供的精密卫星钟差, 采用修正 Allan 方差分析了卫星原子钟的时频稳定性、噪声类型以及卫星钟差的周期性特性, 并对各周期项的振幅进行了研究。结果表明: 1) GPS 的峰值很明显, GLONASS 峰值不太明显, 4 个峰值对应的周期分别为卫星运行周期的 1、1/2、1/3、1/4 周; 2) 去除周期项之后的 GPS 钟差的修正 Allan 标准差有明显的变化, 但 GLONASS 钟差的修正 Allan 标准差没有特别明显的变化, 表明 GPS 卫星钟差中存在周期项, 而 GLONASS 卫星钟差里的周期信号不明显, 受周期性变化的影响很小; 3) 不同时间段的卫星振幅是随着时间变化的。

关键词 卫星钟差; 最小二乘频谱分析; 修正 Allan 方差; GPS; GLONASS

中图分类号: P207

文献标识码: A

STUDY OF CHARACTER OF GPS/GLONASS SATELLITE CLOCK CORRECTION BASED ON LEAST SQUARE SPECTRAL ANALYSIS

Yang Sainan¹⁾, Chen Junping¹⁾, Zhang Yize^{1 2)}, Pei Xiao^{1 2)}, Yu Wei^{1 2)} and Xie Yibing^{1 2)}

(1) Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030
(2) College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092

Abstract Precise satellite clock corrections over 1 year provided by IGS are analyzed to find out the periodical character of satellite clock corrections. The modified Allan deviation (MDEV) of each GPS and GLONASS satellite is calculated to analyze the time-frequency stability and the type of noise in the atomic clock. Periodic character of satellite clock corrections and temporal variation of amplitude corresponding to each peak are analyzed in detail. Results show that: 1) Spectral peaks are found on amplitude spectrum of GPS and GLONASS satellites with periods corresponding to 1 circle, 1/2 circle, 1/3 circle, 1/4 circle of the satellite orbit period respectively while GPS's peaks are clear and GLONASS's are not; 2) Removing the periodic signal, obvious changes are visible in the MDEV of GPS satellite clock corrections, but not in GLONASS. This indicates that the periodic signal is strong in GPS satellite clock corrections, but not in GLONASS; 3) Comparisons of amplitude of satellite clock corrections over different time shows that variation of amplitude varies with time.

Key words: satellite clock correction; least square spectral analysis; modified Allan variance; GPS; GLONASS

* 收稿日期: 2013-09-26

基金项目: 中国科学院百人计划; 国家 863 计划(2013AA122402); 国家自然科学基金(11273046, 40974018, 11203059); 上海市科学技术委员会课题(12DZ2273300, 13PJ1409900)

作者简介: 杨赛男, 女, 1990 年生, 硕士生, 主要研究方向为 GPS 数据处理。E-mail: snyang@shao.ac.cn

1 引言

卫星导航的测量本质是精确时间的测量。卫星钟 $0.1 \mu\text{s}$ 的时间误差会在测距中引起 30 m 的误差。卫星钟差是高精度实时导航定位、授时的主要误差^[1, 2]。由于星载频标不稳定,卫星钟差难以用精确模型或函数描述,卫星钟差的内插以及预报得到的卫星钟差精度相对较低。因此国内外许多学者在 GPS 卫星钟差的预报研究中提出了多种卫星钟差预报模型,其中较为经典的为二次多项式拟合模型^[3]。

本文将根据二次多项式拟合模型,分别对 GPS、GLONASS 的精密卫星钟差数据进行拟合,得到卫星钟差残差,再针对残差部分建模,建立周期函数,得到复合卫星钟差模型,并采用修正 Allan 标准差分析复合模型的精度。

2 卫星原子时钟的时频稳定性分析

卫星原子时钟的时频稳定性一般由 Allan 方差表示,但 Allan 方差不能很好地分辨调相随机游走噪声(RWPM)和调相闪变噪声(FPM),因此本文采用修正 Allan 方差^[4-7]对卫星原子钟时频进行稳定性分析。选取 IGS 提供的 2011-02-01 ~ 20 的 GPS 卫

星钟差和 GLONASS 卫星钟差进行分析。去除卫星钟差的二次多项式趋势项后,计算修正 Allan 标准差(MDEV),计算结果如图 1。

图 1 为 GPS 卫星 20 d 的钟差数据去除二次多项式趋势项后的 MDEV。从图 2 得知:1) 卫星钟差的稳定性和卫星钟的类型有一定的联系。当平滑时间在 300 ~ 3 000 s 时,II A Cs 钟的噪声比较接近调相随机游走噪声,而在 3 000 ~ 30 000 s,II A Cs 钟的噪声比较复杂,在大于 30 000 s 以后,又表现为调相随机游走噪声;II A Rb 钟和 II A Cs 钟的情况类似,但总体稳定度比 II A Cs 钟高一个数量级;2) II R Rb 钟和 II R-M Rb 钟的情况非常相似,稳定度的数量级相差不大,在 300 ~ 2 000 s 区间表现为调相白噪声,在 2 000 ~ 30 000 s 区间内较为复杂,在大于 30 000 s 之后更为复杂,有的 Rb 钟体现出调频随机游走噪声,有的表现为调相随机游走噪声,但总体上 II R Rb 钟和 II R-M Rb 钟的稳定度比 II A Rb 钟的稳定度好;3) 新的 II F Rb 钟在 300 ~ 2 000 s 先表现为调相闪变噪声,后变为调相随机游走噪声;当平滑时间变大时,卫星钟的变化变得复杂。另外,II F Rb 钟的稳定度较以前的 Rb 钟有了一些提高。

图 2 为 GLONASS 卫星 20 d 钟差数据去除二次多项式趋势项后的 MDEV,由于 GLONASS 卫星钟的

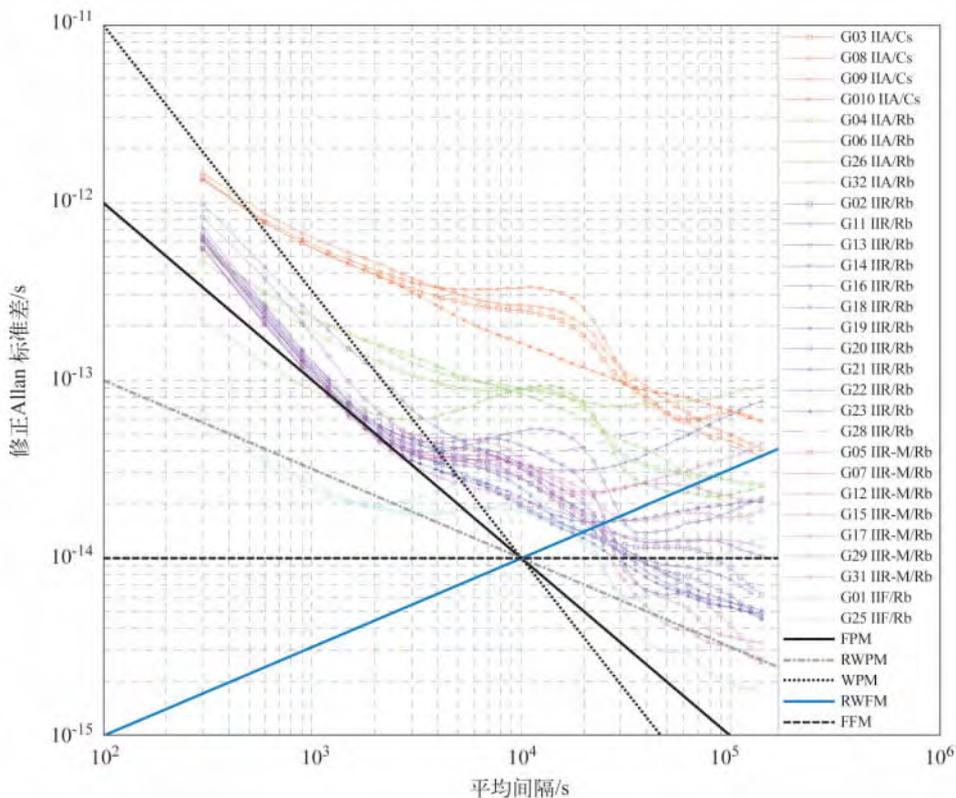


图 1 2011-02-01 ~ 20GPS 卫星钟差的修正 Allan 标准差

Fig. 1 MDEV of GPS satellite clock correction during 2011-02-01 ~ 20

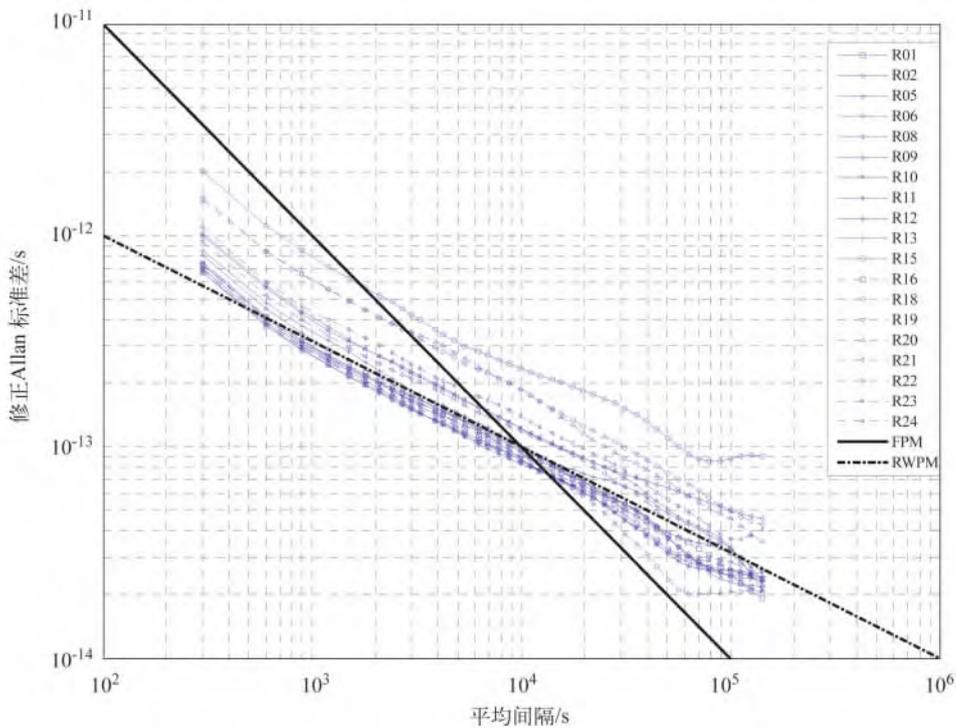


图 2 2011-01-01 ~ 20GLONASS 卫星钟差的修正 Allan 标准差

Fig.2 MDEV of GLONASS satellite clock correction during 2011-01-01 ~ 20

类型一致 因此每颗卫星的修正 Allan 标准差都比较接近。300 ~ 600 s ,GLONASS 卫星钟差比较接近调相闪烁噪声 在大于 600 s 的平滑区间上 ,GLONASS 卫星钟差的噪声主要体现为调相随机游走噪声; 各颗卫星之间的稳定度都比较接近 没有复杂变化。

3 复合卫星钟差模型

对修正 Allan 方差结果的分析表明 卫星钟差特别是 GPS 卫星钟差在去除二次多项式趋势后还存在复杂的信号 针对该剩余信号建立周期函数模型为:

$$\delta t^s(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \sum P_i \sin(\omega_i t + \theta_i) + \varepsilon \tag{1}$$

式中 $\delta t^s(t)$ 表示 t 时刻卫星的钟差改正数 $b_0 + b_1 t + b_2 t^2$ 代表二次多项式趋势项部分 $\sum P_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$ 表示钟差中的周期信号(有可能存在几个周期信号的叠加) P_i, ω_i, θ_i 分别代表了周期信号的振幅、频率、初相位 ε 代表模型误差。

为了检测剩余信号的周期,需对数据的频率域进行频谱分析,求出周期信号的振幅 P 、频率 ω 、初相位 θ 。由于时间序列存在周期波动,本文采用最小二乘频谱分析^[8-11]。

4 算例与分析

4.1 数据预处理

为检测卫星钟差的周期性,从 IGS 数据中心下

载连续一年采样率为 5 min 的钟差数据。

数据预处理的步骤为: 去除在卫星维护期间和工作频率发生变化的时间段内的 IGS 钟差数据; 以每天弧长的卫星钟差为单位,去除每颗卫星钟差的二次多项式趋势项。当一天获取的卫星钟差大于 80% 的弧长单位时才能进行数据处理,进行频谱分析。

4.2 利用最小二乘频谱分析搜索卫星的主频率

去除卫星钟差的二次多项式趋势项后,使用 LSSA 计算每个频率的幅度,生成每颗卫星的最终 IGS 频谱。在频谱图上的峰值附近进行搜索,得到精确的主频率。去除检测到的周期,尽可能减小已搜索到的主频率与其他周期的主频率的相关性,可继续搜索出其他 3 个主频率。图 3 为 2 颗 GPS 卫星 1 年数据的卫星钟差频谱图。

通过图 3 可以看出,2 个频谱图上都出现了 4 个峰值,但在 GLONASS 的 2 幅卫星频谱图中峰值不是很明显(图 4)。在峰值附近减小步长进行搜索,得到峰值的周期如表 1、2 所示。

从表 1 可见, GPS 卫星的运行周期为 11 h 58 min $T_{GPS} = 43\ 080\ s$, 而 GPS 卫星钟差的第一周期的均值为 $43\ 145.2\ s \approx T_{GPS}$, 第二周期均值为 $21\ 554.52\ s \approx 1/2 T_{GPS}$, 第三周期均值为 $14\ 389.75\ s \approx 1/3 T_{GPS}$, 第四周期均值为 $10\ 766.86\ s \approx 1/4 T_{GPS}$ 。

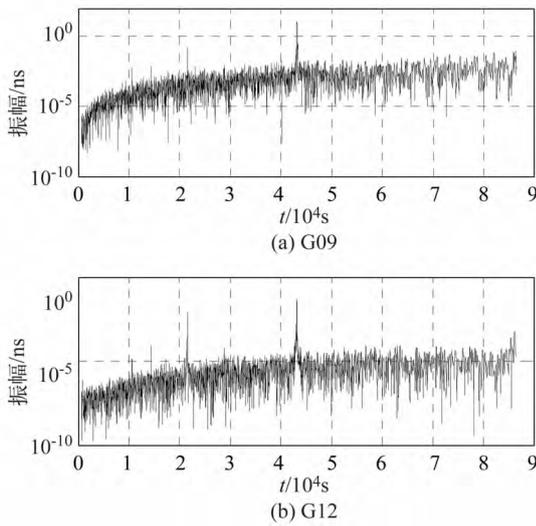


图3 GPS 9号、12号卫星钟差频谱图

Fig.3 Spectrum of GPS P09、P12 satellite clock correction

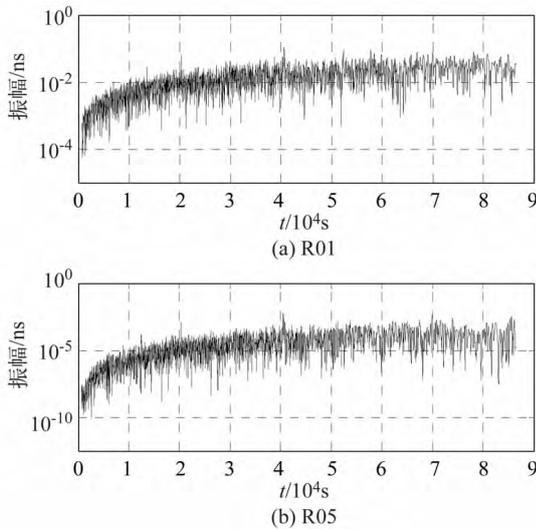


图4 GLONASS 1号、5号卫星钟差频谱图

Fig.4 Spectrum of GLONASS R01、R05 satellite clock correction

表1 GPS 卫星钟差的主频率(平均标准差)

Tab.1 Main frequency of GPS satellite clock correction (mean Std)

星/钟	第一周期 (s)	第二周期 (s)	第三周期 (s)	第四周期 (s)
II A/Cs	43 138.31	21 568.88	14 405.17	10 730.94
	1.36	0.32	43.33	102.76
II A/Rb	43 138.38	21 575.98	14 419.51	10 718.47
	3.46	16.02	68.42	62.15
II R/Rb	43 149.15	21 543.54	14 382.62	10 796.16
	34.80	12.13	56.30	38.81
II R-M/Rb	43 136.79	21 555.32	14 385.15	10 772.91
	2.02	16.39	11.65	64.37
II F/Rb	43 178.38	21 545.99	14 358.32	10 738.51
	51.81	32.52	8.85	76.42

表2 GLONASS 卫星钟差的主频率(平均标准差)

Tab.2 Main frequency of GLONASS satellite clock correction(mean Std)

卫星钟 类型	第一周期 (s)	第二周期 (s)	第三周期 (s)	第四周期 (s)
GLONASS-M	40 512.552	20 280.042	13 555.435	10 108.248
	59.91	36.81	107.84	103.65

GLONASS 卫星的运行周期为 11 h15 min44 s, $T_{GLO} = 40\ 544\ s$, GLONASS 卫星钟差的第一周期均值为 $40\ 512.55\ s \approx T_{GLO}$, 第二周期均值为 $20\ 280.04\ s \approx 1/2T_{GLO}$, 第三周期均值为 $13\ 555.43\ s \approx 1/3T_{GLO}$, 第四周期均值为 $10\ 180.25\ s \approx 1/4T_{GLO}$ 。卫星钟差的4个周期分别为卫星运行周期的 1、1/2、1/3、1/4 周。

4.3 卫星钟差去除周期项前后的修正 Allan 标准差对比

仍选取 2011-02-01 ~ 20 的 GPS 卫星钟差和 GLONASS 卫星钟差进行分析, GPS 的每钟星钟类型各选取 1 颗卫星: G09 II A/Cs、G32 II A/Rb、G11 II R/Rb、G15 II R-M/Rb 和 G25 II F/Rb, GLONASS 选取 2 颗卫星: R15、R22。

图 5 为 5 颗 GPS 卫星去除周期项前后的 MDEV, 发现去除周期项后卫星钟差的 MDEV 在 2 000 ~ 30 000 s 的 MDEV 发生明显变化, 表明 GPS 卫星钟差中的周期信号确实存在, 且周期项的存在影响了时间间隔在 2 000 ~ 30 000 s 的修正 Allan 标准差。G09 II A/Cs、G32 II A/Rb、G11 II R/Rb 和 G25 II F/Rb 的卫星钟差去除周期项后, 在 2 000 ~ 30 000 s 区间由原来复杂的噪声变成以调相随机游走噪声为主导, 而 G15 II R-M/Rb 的钟差在 2 000 ~ 10 000 s 区间内主要是调相随机游走噪声, 在 10 000 ~ 30 000 s 内主要是调相随机游走噪声; 在其他时间间隔内对卫星钟差的 MDEV 几乎没有影响。

从图 6 可看出, GLONASS 卫星钟差的 MDEV 没有发生大的变化, MDEV 曲线基本重合。GLONASS 卫星钟差虽然在频谱分析中搜索出峰值对应的频率, 但是峰值相对较小, 说明在峰值对应的周期上的功率不是很大, 进一步验证了 GLONASS 卫星钟差中的周期性信号不明显。

4.4 卫星钟差的周期振幅随时间的变化

为研究卫星钟差振幅随时间的变化, 以每 20 d 的卫星钟差作为 1 组数据计算主周期分别对应的 4 个振幅, 相邻的 2 组数据有 10 d 的钟差是重叠的。

图 7 分析得出, GPS 卫星 G09 卫星钟差的振幅随时间的变化比较明显, 第 1 振幅在 2 ~ 3.5 ns 变化, 第 2 振幅在 0.5 ~ 1.5 ns 间变化, 而第 3 和第 4 振幅

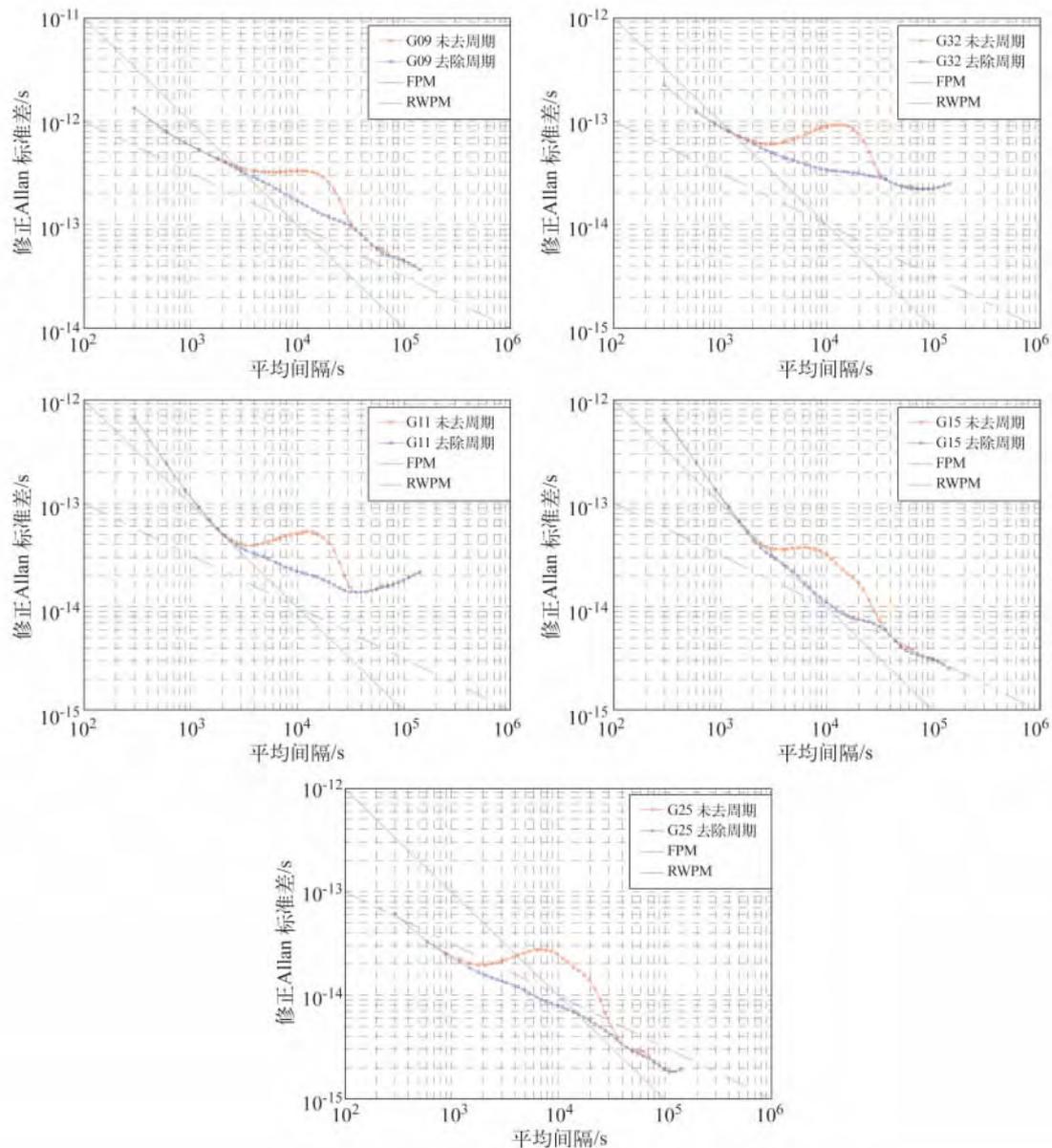


图 5 GPS 5 颗卫星去除周期项前后的 MDEV 对比

Fig. 5 Comparison of MDEV of GPS satellite clock correction before and after removing periodic trend

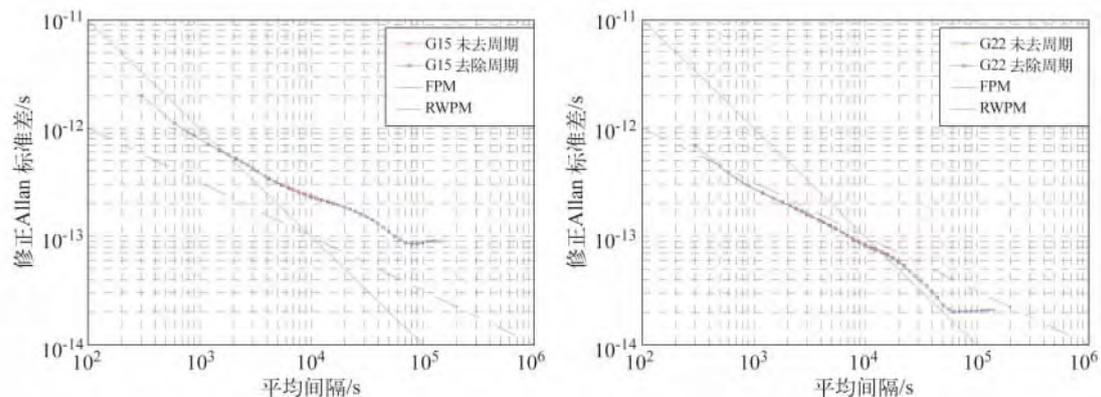


图 6 GLONASS 2 颗卫星去除周期项前后的 MDEV 对比

Fig. 6 Comparison of MDEV of GLONASS satellite clock correction before and after removing periodic trend

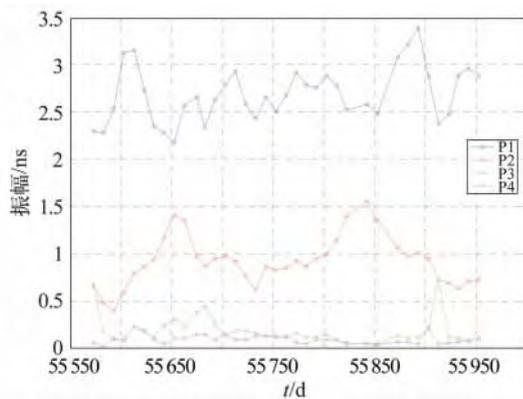


图7 G09 卫星钟差 1 年的振幅变化

Fig.7 Variation of G09 satellite clock correction's amplitude during 1 year

的变化范围较小。第 1 和第 2 振幅的变化过程中存在一定的周期性,在 1 年时间内包含 2 个明显的周期变化,这一变化可能是由外界因素引起的。

5 结语

本文提出一种复合卫星钟差模型,在建模前利用修正 Allan 标准差分析卫星原子钟的时频稳定性,并判断每颗卫星钟差的噪声类型。根据最小二乘频谱分析,发现 GPS 卫星和 GLONASS 卫星钟差频谱图中出现了峰值,GPS 卫星的峰值比较明显,而 GLONASS 卫星的峰值相对不太明显,在峰值附近搜索出峰值对应的周期,分别为卫星运行周期的 1、1/2、1/3、1/4 周。计算去除周期项前后卫星钟差的修正 Allan 标准差,结果表明,去除周期项之后的 GPS 钟差的修正 Allan 标准差有明显的改变,但是 GLONASS 钟差没有特别明显的变化,表明 GPS 卫星钟差中存在周期项,而 GLONASS 卫星钟差的周期性信号不明显。同时计算不同时间段的卫星钟差的振幅,发现卫星钟差的振幅随着时间发生变化,可能由于外界综合因素的影响。

参 考 文 献

1 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. (Guo Hairong. The study of theory and method of time-frequency analysis of atomic clock of

navigation satellite [D]. Zhengzhou: Information Engineering University 2006)

- 2 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005. (Li Zhenghang and Huang Jinsong. GPS surveying and data processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press 2005)
- 3 Koppang et al. Alternate algorithms for steering to make GPS time [C]. 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000), Salt Lake City 2000.
- 4 黄观文, 张勤, 王继刚. GPS 卫星钟差的估计与预报研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009 (6): 119 - 125. (Huang Guanwen, Zhang Qin and Wang Jigang. The study of estimation and prediction of GPS satellite clock correction [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics 2009(6): 119 - 125)
- 5 焦月, 寇艳红. GPS 卫星钟差分析、建模及仿真 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2011, 41(5): 596 - 601. (Jiao Y and Kou Y H. Analysis, modeling and simulation of GPS satellite clock errors [J]. Sci Sin Phys Mech Astron 2011, 41: 596 - 601.
- 6 Allan D W and Barnes J A. A modified Allan variance with increased oscillator characterization ability [C]. 35th Annual Frequency Control Symposium, 1981.
- 7 Senior K, Ray J and Beard R. Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks [J]. GPS Solutions, 2008(12): 211 - 225.
- 8 Well D E, Vanicek P and Pagiatakis S D. Least square spectral analysis revisited [A]. Tech Rep 84 Department of Surveying Engineering [C]. University of New Brunswick, Fredericton, 1985.
- 9 Vanicek P. Approximate spectral analysis by least-squares fit [J]. Astrophysics and Space Science, 1969(4): 387 - 391.
- 10 Vanicek P. Further development and properties of the spectral analysis by least-squares [J]. Astrophysics and Space Science, 1971(12): 10 - 33.
- 11 尹晖, Spiros D P. 最小二乘谱及其在超导重力观测数据分析中的应用 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(7): 613 - 616. (Yin Hui and Spiros D P. Least squares spectral analysis and its application to superconducting gravimeter data analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University 2005, 30(7): 613 - 616)