

利用平滑广播星历的 GNSS 星载钟短稳评估方法

龚 航¹ 刘增军¹ 彭 竞¹ 王飞雪¹

(1 国防科技大学电子科学与工程学院卫星导航定位技术工程研究中心,长沙市德雅路 190 号,410073)

摘 要:由于没有精密钟差数据,目前北斗和 Galileo 系统的一般用户很难获得精确的星载钟短期稳定度参数。在分析利用单个监测站观测数据实现星载钟短稳评估方法的基础上,提出了一种利用平滑广播星历的简单评估方法,给出了该方法的实现原理,并对其中的误差修正方法进行了讨论。利用 GPS 数据进行了有效性验证,与 IGS 的结果比较表明,该方法对 800 s 平滑间隔内的短稳评估相对误差小于 10%;与利用精密星历(PE 法)和广播星历(BE 法)两种方法的结果比较表明,本文方法与 PE 法获得的结果一致,优于 BE 法的评估性能。利用该方法对目前北斗所有 11 颗卫星(截至 2012-08)的星载钟短稳进行了评估,其结果为 6×10^{-12} ($\tau = 1$ s)、 2×10^{-12} ($\tau = 10$ s)、 5×10^{-13} ($\tau = 100$ s)、 2×10^{-13} ($\tau = 1\ 000$ s)。

关键词:卫星导航系统;星载原子钟;短期稳定度评估;精密星历;平滑广播星历;北斗卫星导航系统;精密定轨与时间同步

中图法分类号:P228.41; TN967.1

星载原子钟的性能评估对于卫星导航系统的运控段具有重大的意义。对于卫星钟差建模仿真以及钟差预报等应用,除了需要已知由卫星钟的中长期稳定度确定的钟差特性外,还需要获得卫星钟的短期稳定度参数。目前,对 GPS 星载钟稳定度评估的基本方法是利用 IGS 的精密钟差产品,但由于其采样率通常为 30 s,最高为 5 s(欧洲定轨中心 CODE),无法对更短平滑间隔的稳定度进行评估。并且 IGS 目前仅提供 GPS、GLO-NASS 的数据,不适用于正在建设的北斗卫星导航系统(BDS)和 Galileo 系统。

另一方面,解算卫星钟差通常采用的精密定轨与时间同步方法(orbit determination and time synchronization, ODTS)需要大型地面监测网的连续观测和复杂的钟差确定算法。对于北斗系统,由于地面监测网还处于建设初期,没有全球分布的监测站对卫星连续跟踪,并且由于访问权限限制,只有少数机构可以获取其区域监测网的观测数据,因此,一般用户要获取精确的卫星钟参数存在困难, Galileo 用户目前也存在类似问题。基于此,本文提出了一种利用平滑广播星历的简单评估方法。

1 卫星钟稳定度单站评估方法

对于卫星 i ,接收机 j 在频点 k 上的伪距和载波相位观测方程分别为:

$$\rho_k^{ij} = d^{ij} + c(\Delta t_S^i - \Delta t_R^j) + T_k^{ij} + s^{ij} + t_k^i + r_k^j + m^{ij} + \epsilon_{\rho k}^{ij} \quad (1)$$

$$\varphi_k^{ij} \lambda_k = d^{ij} + c(\Delta t_S^i - \Delta t_R^j) + T_k^{ij} - N_k^{ij} \lambda_k + \varphi_{k0}^{ij} \lambda_k + s^{ij} + t_k^i + r_k^j + m^{ij} + \epsilon_{\varphi k}^{ij} \quad (2)$$

式中, ρ_k^{ij} 为观测伪距; φ_k^{ij} 为载波相位观测值; d^{ij} 为卫星与接收机的几何距离; Δt_S^i 、 Δt_R^j 分别为卫星和接收机钟差; T_k^{ij} 为大气传播延迟,包括电离层、对流层延迟等; N_k^{ij} 、 φ_{k0}^{ij} 分别为载波相位的整周项和小数项; s^{ij} 为 Sagnac 效应引起的误差; t_k^i 、 r_k^j 分别为卫星的发射零值和接收机的接收零值; m^{ij} 为多径误差; $\epsilon_{\rho k}^{ij}$ 、 $\epsilon_{\varphi k}^{ij}$ 分别为伪距和载波相位的观测噪声。

由式(1)、式(2)可知,利用单站单星观测实现卫星钟差解算需要对以下变量进行误差修正:

- ① 卫星与接收机的几何距离 d^{ij} ;
- ② 接收机钟差 Δt_R^j ;
- ③ 大气传播延迟 T_k^{ij} 、Sagnac 效应 s^{ij} 、多径误差 m^{ij} 等;
- ④ 观测噪声 $\epsilon_{\rho k}^{ij}$ 、 $\epsilon_{\varphi k}^{ij}$ 。其中,对流层延迟、

收稿日期:2013-04-21。

项目来源:中国卫星导航学术年会青年优秀论文资助项目(CSNC2011-QY-11)。

Sagnac 效应等可以利用模型消除;电离层延迟利用模型或者双频等方法消除;多径误差通过控制接收机天线环境减少多径干扰,并通过抗多径算法进行抑制。观测噪声为高频噪声,会影响星载钟短稳的评估精度,考虑短稳计算,可以只对卫星钟差的相对值进行修正,因此,可以选择观测噪声较小的载波相位观测量,即利用式(2)进行计算。这种情况下可以不修正接收机钟差,构建以接收机时钟为基准的卫星钟差,只需接收机时钟的稳定度高于星载钟,这是一个较容易满足的条件,如选择氢钟作为接收机的参考时钟。从这个角度分析,当接收机时钟稳定度低于星载钟时,可以利用该方法对接收机时钟的稳定度进行评估。

在完成上述误差修正的条件下,构建以接收机时钟为基准的卫星钟差为:

$$\Delta t^i = (\varphi_{ij}^i - d^i)/c + \Delta \epsilon_{\varphi}^i \quad (3)$$

式中, $\Delta \epsilon_{\varphi}^i$ 为上述误差修正后的残差。利用接收机可以获得高采样率的载波相位观测值 φ_k^i , 只要确定卫星与接收机的几何距离,由式(3)即可获得高采样率的卫星钟差,进而实现对其短稳的评估。

接收机位置可以事先精确标定,确定星地几何距离的主要问题是获取精确的卫星位置。针对卫星位置误差的消除方法,有3种途径可以减小星地几何距离的计算误差:①获得精确的卫星位置,如利用精密星历^[1]等;②精确测定卫星与接收机的几何距离,如利用激光测距^[2]等;③设法对消几何距离误差影响,如利用星地双向测距^[3]等。这些方法均不适用于目前北斗和 Galileo 的一般用户,因此,本文在分析广播星历误差的基础上,提出了一种更为简单有效的消除卫星位置误差影响的方法。

2 利用广播星历的评估方法

2.1 广播星历误差分析

对于北斗和 Galileo 系统,由于目前没有精密星历可用,用户只能利用广播星历计算卫星位置。广播星历是主控站通过 ODTS 方法精密定轨后进行前向预报的结果^[4],存在预报误差。预报轨道的法向和切向误差一般为 5~10 m,但是径向误差由于观测充分会小很多,只有法向和切向的 1/3~1/4^[4],并且变化速度较为缓慢,投影到接收机视线方向上的误差具有类似特性。以 USNO 监测站为例,2011-09-10 对该站连续观测的 GPS PRN14 的广播星历与精密星历相比的 ECEF 坐标误差如图 1 所示。

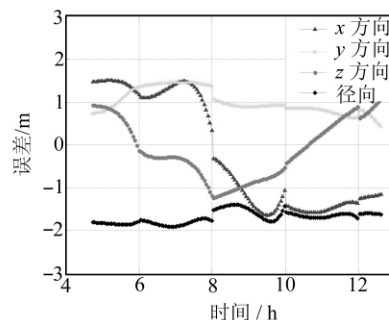


图1 GPS PRN14 广播星历误差

Fig. 1 Broadcast Ephemeris Error of GPS PRN14

由图 1 可以看出,广播星历虽然在 x 、 y 、 z 方向上的绝对误差变化可达 ± 2 m(约 ± 6 ns),但是在接收机视线方向上的相对误差变化幅度小于 1 m,并且变化较为缓慢,这对单站评估方法不会造成致命的影响。因此,在无法获取精密星历的条件下,可以考虑利用广播星历对星载钟短稳进行评估。

2.2 广播星历平滑方法

以 GPS 为例,广播星历每 2 h 更新一次,每组星历参数对其 TOE 前后 2 h 有效,在 TOE 时刻精度最高,随着星历龄期的增长,精度逐渐降低。由于每组星历参数是对不同区间的预报数据进行拟合的结果,因此利用不同组参数计算的卫星轨道会在星历更新时刻出现跳变,如图 1 中星历更新时刻出现在偶数小时处。特别是当有更新星历存在时,轨道跳变间隔只有 16 s^[5],并且更新星历是无规律出现的,这种轨道跳变会直接导致计算的卫星钟差出现相位跳变,从而对短稳评估产生影响,因此,需要考虑对广播星历进行平滑处理。

由于每组星历参数对于前后 2 h 均有效,因此对于每个时刻均有前后相邻两组星历可用。并且每组广播星历的预报误差是相当的,对广播星历的平滑可以采用根据星历龄期线性加权的方法。即对于观测时刻 t , 2 h 内存在前后两组相邻的广播星历,这里分别称为后向星历和前向星历,其 TOE 分别记为 t_b 、 t_f ,分别利用前向星历和后向星历计算 t 时刻的卫星位置,记为 P_b 、 P_f ,这样采用线性加权方法获得的基于平滑广播星历的卫星位置 P 为:

$$P = \frac{t_f - t}{t_f - t_b} \cdot P_b + \frac{t - t_b}{t_f - t_b} \cdot P_f$$

$$P_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T \quad (4)$$

以 USNO 监测站为例,以 IGS 精密星历计算的卫星位置作为真值,图 2 为对图 1 中广播星历进行平滑的结果。表 1 为对多颗卫星的广播星历

在平滑前后卫星位置误差变化的统计结果,其中误差的 RMS 由视线方向上距离误差折算成钟差的 Allan 偏差来表征(平滑间隔 15 min),该统计量反映了卫星位置误差在计算卫星钟差时对其稳定度的影响。

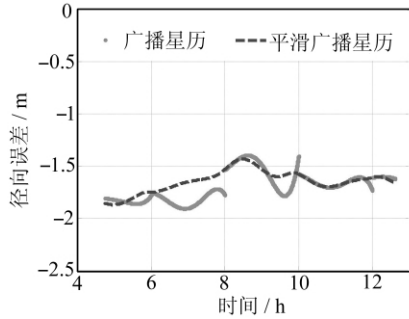


图 2 GPS PRN14 平滑广播星历误差

Fig. 2 Smoothed Broadcast Ephemeris Error of GPS PRN14

由图 2 和表 1 的结果可以看出,广播星历平滑前后卫星位置误差的均值变化较小,但是 RMS 减小了 50% 以上。这是由于广播星历本身存在预报误差,对其进行平滑并不能显著提高卫星的位置精度,但是可以消除轨道跳变,使误差 RMS 得到改善,这将大大减小单站方法对星载钟稳定度的评估误差。

表 1 广播星历平滑前后卫星位置误差变化

Tab. 1 Satellite Position Error Before and After Smoothing Broadcast Ephemeris

卫星	误差均值/m		Allan 偏差/ 10^{-10}	
	平滑前	平滑后	平滑前	平滑后
PRN6	-0.94	-0.92	2.98	0.99
PRN14	-1.70	-1.65	1.84	0.70
PRN22	-0.02	0.01	1.31	0.52
PRN31	0.05	0.05	1.40	0.69

3 评估实验与结果分析

3.1 评估实验

利用 IGS 公布的 USNO 监测站的 GPS 观测数据对本文方法(SBE 法)进行验证,并与利用精密星历(PE 法)、广播星历方法(BE 法)进行比较。该站接收机的时钟参考来自经 UTC(USNO)驯服的氢钟,可以保证接收机时钟的短稳和长稳均优于星载钟。以该站连续观测时间较长的 PRN14 为例,观测时间段为 GPST 2010-09-10 T06:00:00 至 2010-09-10 T12:00:00,分别利用 PE、BE、SBE 等 3 种方法进行评估实验,并将计算结果与 CODE 提供的精密钟差进行比较。

首先给出 PE 法对 PRN14 星载钟(Rb)短稳的评估结果,如图 3 所示。可以看出,PE 法估算的短稳与利用 IGS 精密钟差计算的结果在 5~1 000 s 平滑间隔内基本相符。其中, L_1 、 L_2 的电离层延迟采用 Klobuchar 模型修正方法,iono-free 采用双频修正方法,可见,双频组合有效地修正了电离层影响,使 iono-free 在平滑间隔 1 000 s 以上好于 L_1 、 L_2 ,并且 10 s 以内的短稳没有恶化。为了简单起见,以下讨论均以 iono-free 为例进行比较,其他观测量的结果类似。

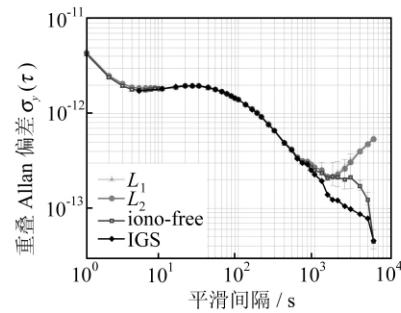


图 3 利用 PE 法对 GPS PRN14 的短稳评估结果

Fig. 3 Frequency Stability of PRN14 by PE Method

基于双频无电离层组合观测,分别利用 BE、SBE 法对 PRN14 星载钟短稳进行评估,结果如图 4 所示。

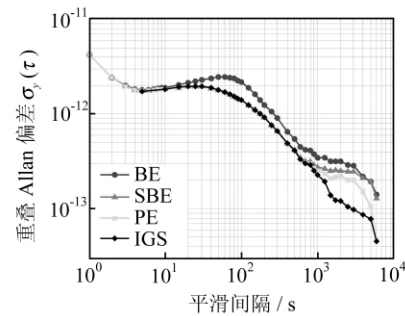


图 4 利用 BE、SBE 法对 PRN14 的短稳评估结果

Fig. 4 Frequency Stability of PRN14 by BE and SBE Methods

3.2 结果分析

以利用 IGS 精密钟差计算的短期稳定度作为真值,以 PE 法、BE 法、SBE 法计算的结果与真值的相对偏差作为 3 种方法的估计误差。将误差小于 10% (误差比真值小一个数量级) 的最大平滑间隔作为评估方法的最大适用平滑间隔,将 1 000 s 内的最大相对偏差作为评估方法的最大估计误差。3 种方法的评估性能如表 2 所示。

综合上述分析,可以得出以下结论:

1) PE 法估计的稳定度与真值在 900 s 平滑间隔内基本一致,估计相对误差小于 10%,特别

表2 3种方法的评估性能比较

Tab. 2 Performance Comparison of PE, BE and SBE Methods

	PE	BE	SBE
最大适用平滑间隔/s	900	20	800
最大估计误差/%	10.6	55.2	20.9
现阶段适用系统	GPS	GPS	GPS
	GLONASS	GLONASS	GLONASS
	GLONASS	BDS	BDS
		Galileo	Galileo

在 10~500 s 内,误差比真值小两个数量级;

2) BE 法计算卫星位置引入的轨道跳变对稳定度评估会产生较大影响,导致平滑间隔 20 s 以上的稳定度出现偏差,最大估计误差接近 55%;

3) SBE 法消除了轨道跳变的影响,大大降低了 BE 法的评估误差,利用其计算的稳定度与 PE 法的结果十分接近,并且与真值一致,在 800 s 内,估计误差小于 10%,特别在 10~500 s 内,误差比真值小两个数量级,说明了本文方法的有效性。

另外可以看到,PE 法和 SBE 法在 1 000 s 以上的结果均出现了较大偏差,分析出现这种现象的原因为:单站观测时,接收机观测弧段有限,GPS 卫星轨道周期约 12 h,仿真表明单站接收机在保持仰角 10°以上最多可连续观测约 9.6 h,采样率 1 s 条件下可获得 34 560 个采样点,按 ±10% 置信区间计算,最多可以评估到约 1 000 s 平滑间隔的频率稳定度^[6](1σ 置信概率)。本文方法结果中相符的平滑间隔最大到 800 s,一方面由于观测数据只有 6 h,另一方面与单向伪距中包含各种修正残差等因素有关。

4 北斗星载钟短稳评估结果

由于目前无法获得北斗精密钟差作为验证手段,并且除了文献[7]给出了利用 ODTs 方法获得的 2012-02 部分卫星的 100 s 以上的稳定度结果外,目前尚无公开发表的北斗星载钟短稳结果。这里基于该系统 01、03 两个监测站同一时段的观测数据利用 SBE 法进行评估,对两个站的结果进行相互验核,同时将文献[7]给出的结果作为对比参考。这两个站的接收机均采用氢钟作为参考,接收机时钟的稳定度优于星载钟。

由于无法获得与文献[7]同时期的观测数据,实验观测时段选择 BDT 2012-08-08 T00:00:00 至 2012-08-09 T00:00:00,利用 B₁、B₃ 频点载波相位构建无电离层组合观测对卫星 SV08 的星

载钟(Rb)短稳进行评估,结果如图 5 所示(文献[7]的结果扣除了卫星钟频漂,为了与其进行比较,图 5 的结果也扣除了频漂)。

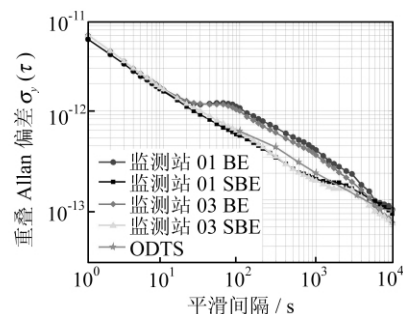


图5 北斗 SV08 星载钟短稳的评估结果
Fig. 5 Frequency Stability of BDS SV08

由图 5 结果可以看出,由于 BDS 广播星历是每 1 h 更新一次,轨道跳变频繁导致 BE 法的误差较大,对广播星历平滑以后,误差大大改善。利用本文方法获得的 01、03 站的计算结果一致,并且与文献[7]的结果也一致,可以认为,图 5 结果中 1 000 s 以内的稳定度反映了 SV08 星载钟的真实特性。

利用本文方法对 2012-08 为止北斗在轨运行的所有 11 颗卫星的星载钟短稳进行评估,基于监测站 01 的 B₁、B₃ 频点观测数据,观测时间段与图 5 相同,结果如图 6 所示(为了反映星载 Rb 钟的频漂特性,图中结果没有扣除频漂影响)。

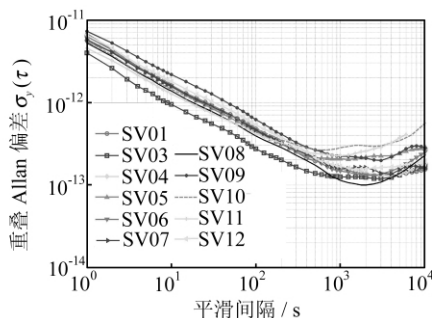


图6 目前北斗所有星载钟的短稳评估结果
Fig. 6 Frequency Stability of All the Current BDS On-Board Clocks

由图 6 可以看出,11 颗卫星的星载钟的稳定度特性基本一致,统计平均特性分别约为 6×10^{-12} (1 s)、 2×10^{-12} (10 s)、 5×10^{-13} (100 s)、 2×10^{-13} (1 000 s),100~1 000 s 的结果与文献[7]给出的结果一致。

5 结 语

本文在分析利用单站观测数据实现星载钟短

稳评估方法的基础上,提出了一种利用平滑广播星历的简单评估方法,利用 GPS 数据对该方法进行了有效验证。结果表明,本文方法对 800 s 平滑间隔内的短稳评估相对误差小于 10%,与利用精密星历的结果一致。利用该方法对目前北斗系统所有 11 颗卫星的星载钟短稳进行了评估,结果基本一致,1 s 稳定度约为 6×10^{-12} , 1 000 s 稳定度约为 2×10^{-13} 。

参 考 文 献

- [1] Delporte J, Boulanger C, Mercier F. Straight Forward Estimations of GNSS On-Board Clocks[C]. IFCS & EFTF, San Francisco, USA, 2011
- [2] 路晓峰, 贾小林, 杨志强. 利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料测定导航卫星钟差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(3): 237-240
- [3] Yang Xuhua, Ma Langming, Sun Baoqi, et al. The Method of Time Synchronization Based on the Combination of Compass GEO Pseudo-range and Two-way Data[C]. IFCS&EFTF, San Francisco, USA, 2011
- [4] Roulston A, Talbot N, Zhang K. An Evaluation of Various GPS Satellite Ephemerides[C]. IONGPS, Salt Lake City, UT, 2000
- [5] Peeters B. Determination of the Accuracy of the Global Positioning System's Broadcast Orbit and the WAAS-corrected Orbit[D]. Fredericton: University of New Brunswick, 1999
- [6] IEEE Standards Coordinating Committee 27. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities[M]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008: 26-29
- [7] 韩春好. 北斗星载原子钟时间同步与在轨性能评估[C]. 第三届中国卫星导航学术年会, 广州, 2012

第一作者简介:龚航,博士生,主要从事 GNSS 时间同步与时间频率系统技术研究。

E-mail:gonghang@nudt.edu.cn

Estimation Method of GNSS On-Board Clock Short-Term Stability Based on Smoothed Broadcast Ephemeris

GONG Hang¹ LIU Zengjun¹ PENG Jing¹ WANG Feixue¹

(1 Satellite Navigation R&D Center, National University of Defense Technology, 190 Deya Road, Changsha 410073, China)

Abstract: It is difficult to obtain precise on-board clock short-term stability for current BDS and Galileo common users since there is no public precise clock data. Based on the analysis of single station estimation method of satellite on-board clock stability, this paper proposes a simple method based on smoothed broadcast ephemeris. The principle of this method is discussed, followed by performance evaluation using GPS data. Compared to IGS final clock product and other two methods namely PE and BE which is based on precise ephemeris and broadcast ephemeris respectively, we conclude that the relative estimation error of the proposed method is less than 10% for average time of 1-800 s, which is consistent with the results of PE method and better than BE method. The short-term stability of all the current BDS on-board clocks (until August 2012) are estimated by this method, with the results of 6×10^{-12} ($\tau=1$ s), 2×10^{-12} ($\tau=10$ s), 5×10^{-13} ($\tau=100$ s), and 2×10^{-13} ($\tau=1\ 000$ s).

Key words: GNSS; on-board clock; short-term stability estimation; precise ephemeris; smoothed broadcast ephemeris; BDS; orbit determination and time synchronization

About the first author: GONG Hang, Ph.D candidate. He majors in frequency & time system and time synchronization in Global Navigation Satellite System.

E-mail: gonghang@nudt.edu.cn