

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.04.012

基于相位平滑伪距的 GNSS 时差监测评估

孔思嘉¹, 刘文祥¹, 胡旖旎², 彭 竞¹, 王飞雪¹

(1. 国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:随着全球卫星导航系统进一步的发展和完善,在系统层面上对各个 GNSS 进行实时时差监测是必要的。为了降低时差监测中伪距观测值的观测噪声及多径误差对时差监测的影响,采用相位平滑伪距的方法对伪距观测值的噪声及多径误差进行平滑,该方法可以实时地对伪距观测值进行处理,并且具有较好的平滑效果。利用平滑后的伪距观测值进行时差监测可以将时差监测值的标准差由 2~4ns 降低到 1~3ns,噪声降低比率平均在 20% 以上。在与 BIPM 公布的时差数据相比,GPS-GLONASS 实测值也具有较好的一致性,可以满足 GNSS 时差监测与预报的需求。

关键词:GNSS 时差监测; 观测噪声; 相位平滑伪距; 时差监测流程; BIPM T 公报

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)04-0076-07

Monitoring and Evaluation on GNSS System Time Offset with Phase-Smoothed Pseudorange

KONG Si-jia¹, LIU Wen-xiang¹, HU Yi-ni², PENG Jing¹, WANG Fei-xue¹

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of tracking and communication technology, Beijing 100094, China)

Abstract: With the further development and improvement of the global satellite navigation system, it is necessary to monitor the real-time system time offset of each GNSS. To reduce the observation noise and Multipath errors of pseudorange observations during the GNSS system time offset monitoring, this paper uses phase-smoothed pseudorange method to pre-process the pseudorange observations. It is demonstrated that time offset monitoring with pre-processing pseudorange observations can reduce STD of time offset value from 2~4ns to 1~3ns, the ratio of noise reducing averages over 20%, and GPS-GLONASS monitoring value is consistent with the system time offset data published by BIPM. This work will also lead to further research on GNSS system time offset monitoring and forecasting.

Key words: GNSS time offset monitoring; Observation noise; Phase smoothing pseudorange; Time offset monitoring processing; BIPM T bulletin

0 引言

目前全球卫星导航系统主要由四大系统组成,

包括美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 卫星导航系统以及中国的北斗卫星导航系统(BeiDou

收稿日期: 2018-03-02; 修订日期: 2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(41604016)

作者简介: 孔思嘉(1993-), 女, 硕士, 主要从事 GNSS 数据处理方面的研究。E-mail: 2238438604@qq.com

Navigation Satellite System, BDS)。不同的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 都有各自独立的系统时间, 且均可溯源到 UTC。但是由于各个导航系统的系统时产生的物理机制、溯源方式和时间尺度算法都不相同, 导致任意 2 个 GNSS 系统的系统时间都存在一定的差异, 该差异被称为 GNSS 系统时间偏差, 简称为 GNSS 系统时差^[1]。在采用多个系统进行定位时, 如果不对各个系统的系统时间基准进行统一, 系统间的时差会导致用户定位解算出现偏差^[2-3], 因此要实现 BDS 与其他 GNSS 的兼容互操作, 需要对 BDS 与其他 3 个系统的时差进行实时监测并向用户进行时差参数的广播。

系统时差监测方法在总体上分为两大类: 直接建立时间比对链路^[4]和空间信号法^[5]。建立比对链路的方法有两种: 1) 卫星双向时间频率传递法。该方法是在 2 个卫星导航系统的主控站之间建立时间比对链路, 实现 2 个主控站时间的时差量测。该方法能够获得亚纳秒级的时差监测结果, 但是系统复杂且经济成本较高。2) GNSS 卫星共视法。该方法采用伪距观测值进行计算, 其精度较差, 并且该方法需要在 2 个测站上同时观测同一颗卫星, 受观测站位置的影响较大。因此, 采用直接建立比对链路的方法并不适用于多系统的时差监测。空间信号法是利用一台标定过的多模接收机接收多系统卫星信号进行时差解算, 该方法简单, 价格低廉, 是目前 GNSS 时差监测首选方法。空间信号法可以采用伪距和精密单点定位两种方法进行计算, 精密单点定位法精度高, 可达到亚纳秒级的精度, 但是该方法需要采用精密星历、精密钟差且需要较长的收敛时间^[6], 通常只用于事后处理, 在实时的解算中常常采用伪距单点定位的方法。由于伪距观测值的观测噪声及多径误差较大, 为降低伪距观测噪声以及多径误差对时差监测的影响, 本文将采用相位平滑伪距的方法来提高时差监测值的精度, 并且通过对时差监测结果的评估来验证相位平滑伪距方法对提高时差监测精度的有效性。

1 GNSS 时差监测原理与方法

对于任一测站 r 的接收机观测到某一卫星 j , 其在第 i 个频点的伪距观测值表示为

$$P_{i,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + c(dt_r^C - dt^{C,j}) + T_r^{C,j} + I_{i,r}^{C,j} + \epsilon(P_{i,r}^{C,j})$$

$$P_{i,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + c(dt_r^C + \Delta t_{\text{sys}}^{CG} - dt^{G,j}) + T_r^{G,j} + I_{i,r}^{G,j} + \epsilon(P_{i,r}^{G,j})$$

$$P_{i,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + c(dt_r^C + \Delta t_{\text{sys}}^{CR} - dt^{R,j}) + T_r^{R,j} + I_{i,r}^{R,j} + \epsilon(P_{i,r}^{R,j})$$

$$P_{i,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + c(dt_r^C + \Delta t_{\text{sys}}^{CE} - dt^{E,j}) + T_r^{E,j} + I_{i,r}^{E,j} + \epsilon(P_{i,r}^{E,j}) \quad (1)$$

式中, $P_{i,r}^j$ 为原始伪距观测值, 以 m 为单位; 下标 r 为测站编号, 上标 j 为卫星编号, C, G, R, E 为卫星系统, ρ_r^j 为信号发射时刻的站星几何距离, c 为真空中光速, dt_r^C 为以北斗时为基准的接收机钟差, $\Delta t_{\text{sys}}^{CG}, \Delta t_{\text{sys}}^{CR}$ 和 $\Delta t_{\text{sys}}^{CE}$ 为 BDS 与 GPS、GLONASS 和 Galileo 的系统时差, dt^j 为各系统卫星钟差, $I_{i,r}^j$ 为 L_i 频点上的电离层延迟, T_r^j 为对流层延迟, $\epsilon(P_{i,r}^j)$ 为伪距观测噪声和其他未模型化误差。

在时差解算中, 通常采用无电离层组合以消除电离层误差^[7]; 采用 Saastamoinen 模型对对流层误差进行改正; 卫星钟差采用广播星历中的钟差改正数进行改正。采用伪距无电离层组合并将式(1)进行线性化, 可得 BDS、GPS、GLONASS 和 GALILEO 四系统的时差监测方程为

$$\Delta P_{3r}^{C,j} = -\mu_x^{C,j} \Delta x - \mu_y^{C,j} \Delta y - \mu_z^{C,j} \Delta z + c(dt_r^C) + \epsilon(P_{3r}^{C,j})$$

$$\Delta P_{3r}^{G,j} = -\mu_x^{G,j} \Delta x - \mu_y^{G,j} \Delta y - \mu_z^{G,j} \Delta z + c(dt_r^C + \Delta t_{\text{sys}}^{CG}) + \epsilon(P_{3r}^{G,j})$$

$$\Delta P_{3r}^{R,j} = -\mu_x^{R,j} \Delta x - \mu_y^{R,j} \Delta y - \mu_z^{R,j} \Delta z + c(dt_r^C + \Delta t_{\text{sys}}^{CR}) + \epsilon(P_{3r}^{R,j})$$

$$\Delta P_{3r}^{E,j} = -\mu_x^{E,j} \Delta x - \mu_y^{E,j} \Delta y - \mu_z^{E,j} \Delta z + c(dt_r^C + \Delta t_{\text{sys}}^{CE}) + \epsilon(P_{3r}^{E,j}) \quad (2)$$

式中, ΔP_{3r}^j 为伪距观测残差, 即观测值减去计算值。 $[-\mu_x^j, -\mu_y^j, -\mu_z^j]$ 为卫星到观测站的单位矢量, $[\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt_r^C]$ 分别为坐标改正数和钟差改正数, 其余符号含义与上文相同。此时方程中的待估参数为

$$\mathbf{x} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt_r^C, \Delta t_{\text{sys}}^{CG}, \Delta t_{\text{sys}}^{CR}, \Delta t_{\text{sys}}^{CE}] \quad (3)$$

式中, 参数符号与上文相同, 利用最小二乘法解算式(2), 即可获得各系统与 BDS 的系统时差。

2 CNMC 相位平滑伪距基本原理

CNMC(Code Noise and Multipath Correction) 算法是一种相位平滑伪距算法, 该算法可以实时削弱伪距噪声及多路径误差^[8-9]。以 B1 频点的伪距观测值为例, 说明相位平滑伪距的过程。GNSS 载波相位和伪距观测方程可表示为:

$$P_1 = \rho + c(dt_r - dt^j) + T + I_1 + dm + \epsilon_p \quad (4)$$

$$L_1 = \rho + c(dt_r - dt^j) + T - I_1 + \lambda_1 N_1 + \delta m + \epsilon_L \quad (5)$$

$$L_2 = \rho + c(dt_r - dt^j) + T - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_1 + \lambda_2 N_2 + \delta m + \epsilon_L \quad (6)$$

式(4)、式(5)、式(6)中, P 为伪距观测值, L 为载波相位观测值, 单位为 m; dt_r 为接收机钟差, dt^j

为卫星钟差, T 为对流层延迟, I_1 为 L_1 频点上的电离层延迟, N 为相位模糊度, λ 为波长, dm 与 δm 为多路径效应, $\varepsilon(P)$ 与 $\varepsilon(L)$ 为观测噪声。

由式(4)、式(5)和式(6)可得

$$\begin{cases} \lambda_3 N_3 = P_1 - L_1 - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1 - L_2) + \eta \\ \lambda_3 N_3 = -\lambda_1 N_1 - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \end{cases} \quad (7)$$

式中, λ_3 与 N_3 为方程组合后的波长及相位模糊度, η 为组合后的多径和观测噪声, f 为频率。

由于多径误差和观测噪声均具有一定的随机性, 利用多历元可以对其进行平滑。考虑到数据处理过程的实时性, 通常假定第一个历元的多径误差为 0, 在未发生周跳的情况下随着历元积累, 在历元 t_i 时的相位模糊度可以表示为

$$\lambda_3 N_3(t_i) = \lambda_3 N_3(t_{i-1}) + \frac{1}{i} \left[P_1(t_i) - L_1(t_i) - \lambda_3 N_3(t_{i-1}) - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t_i) - L_2(t_i)) \right] \quad (8)$$

平滑后的伪距观测值为

$$\begin{cases} \bar{P}_1(t_i) = L_1(t_i) + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t_i) - L_2(t_i)) + \lambda_3 N_3(t_i) \\ \bar{P}_1(t_1) = P_1(t_1) \end{cases} \quad (9)$$

不采用递推公式计算, CNMC 相位平滑伪距可以改写为

$$\bar{P}_1(t_i) = L_1(t_i) + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t_i) + L_2(t_i)) + \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \left(P_1(t_j) - L_1(t_j) - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t_j) - L_2(t_j)) \right) \quad (10)$$

$$\bar{P}_2(t_i) = L_2(t_i) + \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t_i) + L_2(t_i)) + \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \left(P_2(t_j) - L_2(t_j) - \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t_j) - L_2(t_j)) \right) \quad (11)$$

3 基于相位平滑伪距的 GNSS 单站时差监测流程

在进行时差监测的过程中可以采用高精度的测地型双频多模接收机。接收机输出 Rinex 格式的观测文件以及导航电文。接收机的通道时延、线缆时延以及参考信号时延可以作为一个常量偏差,

一般通过相对校准进行处理。对 BDS、GPS、GLO-NASS 和 Galileo 这 4 个系统进行时差监测, 具体计算流程如图 1 所示。首先读取观测文件和星历文件, 对观测值进行预处理, 包括剔除观测值中的粗差, 对于载波相位观测值进行周跳探测与修复; 其次, 利用 CNMC 算法对伪距观测值进行实时平滑, 以降低伪距观测值的多径误差和观测噪声; 再次, 利用卫星星历计算卫星位置, 对平滑后的伪距进行各项误差改正组成观测方程; 最后, 利用最小二乘法进行参数估计, 并利用计算残差进行检验, 残差检验合格则输出时差监测结果, 残差检验不合格则利用完好性算法排除故障卫星再进行计算。

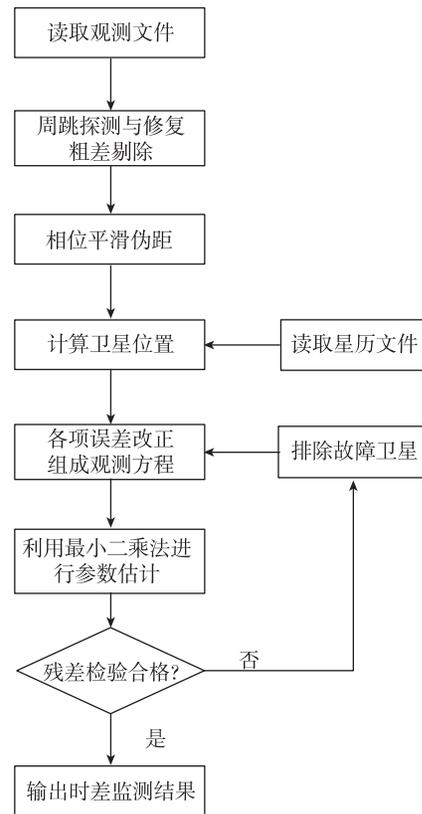


图 1 GNSS 时差监测计算流程

Fig. 1 The processing of time offset monitoring

4 实验结果与分析

为测试相位平滑伪距对时差监测的影响, 本文将根据图 1 中的时差监测流程对实测数据进行处理。通过伪距平滑前后的时差监测结果对比, 以及实测值与 BIPM 公报值的一致性, 验证基于相位平滑伪距的 GNSS 时差监测评估方法的有效性与可靠性。

4.1 伪距平滑前后 GNSS 时差监测结果对比

本实验采用 IGS 九峰(JFNG)站的观测数据,数据观测时间为 2017 年 11 月 21 日至 2017 年 11 月 25 日,采样间隔为 30s,采用 BDS、GPS、GLO-NASS 和 Galileo 这 4 个系统的观测数据。采用广播星历计算卫星位置,依照图 1 中的流程进行时差监测,并对 BDS 与 GPS、GLONASS、Galileo 的时差监测结果进行绘图。其中图 2、图 3、图 4 所示为 BDS-GPS、BDS-GLONASS 和 BDS-Galileo 的伪距平滑前后系统时差值,其中蓝色实线为原始数据的计算结果,红色点线为相位平滑伪距后的计算结果。表 1、表 2、表 3 所示分别为伪距平滑前后系统时差标准差的统计结果及相位平滑伪距方法对观测噪声的降低比率。

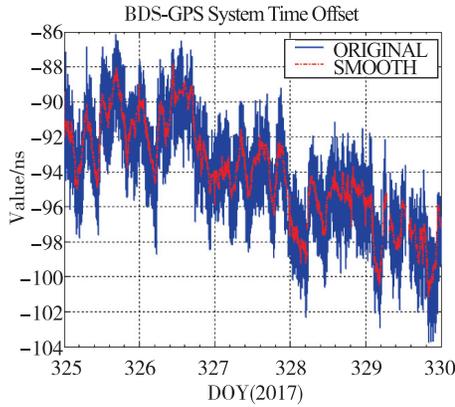


图 2 BDS-GPS 平滑前后时差监测结果
Fig. 2 The BDS-GPS time offset value before and after smoothing

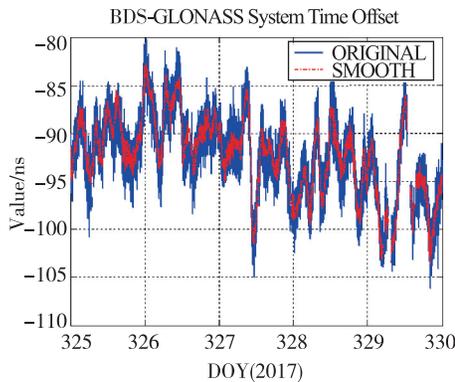


图 3 BDS-GLONASS 平滑前后时差监测结果
Fig. 3 The BDS-GLONASS time offset value before and after smoothing

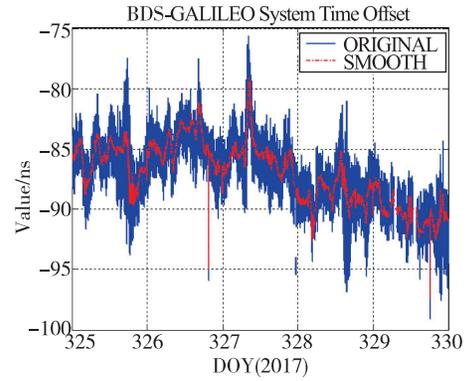


图 4 BDS-GALILEO 平滑前后时差监测结果
Fig. 4 The BDS-GALILEO time offset value before and after smoothing

表 1 BDS-GPS 时差监测标准差

Tab. 1 The STD of BDS-GPS time offset monitoring

年积日	原始观测值/ns	相位平滑伪距/ns	时差值噪声降低率
325	1.9771	1.6108	18.52%
326	2.1066	1.7375	17.52%
327	1.6088	1.0386	35.44%
328	1.6681	1.3050	21.77%
329	1.8732	1.4770	21.15%

表 2 BDS-GLONASS 时差监测标准差

Tab. 2 The STD of BDS-GLONASS time offset monitoring

年积日	原始观测值/ns	相位平滑伪距/ns	时差值噪声降低率
325	2.5501	2.2035	13.59%
326	3.1960	2.7415	14.22%
327	3.5057	3.2220	8.09%
328	3.3712	3.0382	9.88%
329	4.0415	3.9468	2.34%

表 3 BDS-GALILEO 时差监测标准差

Tab. 3 The STD of BDS-GALILEO time offset monitoring

年积日	原始观测值/ns	相位平滑伪距/ns	时差值噪声降低率
325	2.0165	1.4997	25.62%
326	1.8525	1.5753	14.96%
327	2.1340	1.6052	24.78%
328	1.8827	1.1443	39.22%
329	1.8767	1.2727	32.18%

由图 2、图 3、图 4 可以看出,采用相位平滑伪距方法的时差监测结果曲线更为平滑,可以明显降低观测噪声对时差监测的影响,但是对于时差值中的

一些近似于系统性的波动并没有很好的改善。观察图3,可以发现,BDS-GLONASS系统时差曲线中明显包含了一个系统性偏差。由于GLONASS的频分多址系统,导致GLONASS观测值中包含了接收机通道时延偏差^[10]。该偏差在进行时差监测的过程中会吸收到时差监测的结果中,因此在BDS-GLONASS的时差值中包含了一个系统性的偏差,所以采用相位平滑伪距方法对BDS-GLONASS时差监测结果的噪声降低并不明显。观察图2和图4可知,相位平滑伪距方法可以明显降低噪声对于BDS-GPS与BDS-GALILEO时差监测结果的影响。观察BDS-GALILEO系统时差监测结果可以发现,在原始观测值的计算结果中有一个粗差,而平滑后的结果中并没有该粗差,因此可以认为采用相位平滑伪距方法对观测值进行预处理,也可以在一定程度上降低观测值粗差对计算结果的影响。

由表1可知,对于BDS-GPS系统时差监测,采用相位平滑伪距方法可以将时差监测值的标准差降低至2ns以内,观测噪声对时差监测的影响降低17%~35%,时差监测值的噪声降低明显;由表2可知,对于BDS-GLONASS系统时差监测,采用相位平滑伪距方法可以将时差监测值的标准差降低至4ns以内,观测噪声对时差监测的影响降低2%~14%,相位平滑伪距对时差噪声的改善并不明显,具体原因在上文中已经说明;由表3可知,对于BDS-Galileo系统时差监测,采用相位平滑伪距方法可以将系统时差值的标准差降低至2ns以内,观测噪声对时差监测的影响降低14%~39%,时差监测值的噪声降低明显。

对比表1、表2、表3可知,不同天的噪声降低比率并不相同。造成这一现象的原因可能是由于卫星星历误差、对流层误差、接收机硬件延迟等系统性误差的变化导致。相位平滑伪距方法对于观测噪声、多径误差等近似随机性的误差有着较好的降低效果,但是对于系统性误差并不能够起到降低的作用,在某些时候还会导致系统性偏差变大。因此,基于相位平滑伪距的时差监测算法,可以通过降低伪距观测噪声及一部分伪距多径误差的方式提高时差监测值的精度,并不能降低系统性误差对时差监测结果的影响。

4.2 选取多组测站值进行验证

为进一步验证本文所提方法的有效性,选取多个IGS观测站的数据进行解算。除JFNG站之

外,另随机选取4个能够同时观测到GPS、GLONASS、GALILEO和BDS这4个系统卫星的测站,分别为MRO1测站、XMIS测站、LHAZ测站以及MAL2测站。选取观测时间为2017年11月21日的原始观测数据,分别采用原始观测数据和相位平滑伪距后的观测数据计算时差监测值,并对各个测站每天的时差监测结果进行统计。表4、表5、表6所示分别为各个测站伪距平滑前后系统时差标准差的统计结果的具体数值及相位平滑伪距方法对观测噪声的降低比率。

表4 IGS测站BDS-GPS时差监测标准差

Tab. 4 The STD of BDS-GPS time offset monitoring with IGS data

测站名	原始观测值/ns	相位平滑伪距/ns	时差值噪声降低率
JFNG	1.9771	1.6108	18.52%
MRO1	2.2898	1.9584	14.47%
XMIS	2.2135	1.2174	45.00%
LHAZ	2.1672	1.4132	34.79%
MAL2	2.9235	1.9294	34.00%

表5 IGS测站BDS-GLONASS时差监测标准差

Tab. 5 The STD of BDS-GLONASS time offset monitoring with IGS data

测站名	原始观测值/ns	相位平滑伪距/ns	时差值噪声降低率
JFNG	2.5501	2.2035	13.59%
MRO1	4.3432	3.8358	11.68%
XMIS	4.3135	4.3128	0.01%
LHAZ	3.5496	3.2844	7.47%
MAL2	6.1312	5.7254	6.61%

表6 IGS测站BDS-GALILEO时差监测标准差

Tab. 6 The STD of BDS-GALILEO time offset monitoring with IGS data

测站名	原始观测值/ns	相位平滑伪距/ns	时差值噪声降低率
JFNG	2.0165	1.4997	25.63%
MRO1	2.2074	2.0271	8.16%
XMIS	1.7372	1.1326	34.80%
LHAZ	2.1935	1.3118	40.19%
MAL2	2.6903	1.7970	33.20%

由表4、表5、表6可知,对不同的测站,采用相位平滑伪距的方法可以在一定程度上降低观测噪声对时差监测结果的影响。对比不同测站的伪距平滑前后BDS-GPS以及BDS-Galileo的时差监测

结果,显然采用相位平滑伪距方法可以有效降低系统时差值的噪声。而对于 BDS-GLONASS 的时差监测值,采用相位平滑伪距的方法只能略微降低时差监测值的噪声。该结论与 4.1 节的结论具有一致性,表明基于相位平滑伪距的时差监测方法对于不同测站的数据均能够取得一个较好的观测噪声抑制作用。

4.3 与 BIPM 公报值比较

为了验证本文所提出方法的可靠性,将对计算的时差监测结果与国际计量局(BIPM)公布的数据进行比对。BIPM 是国际计量局的简称,BIPM 的 T 公报是 BIPM 在时频领域的官方计算结果^[7]。目前,T 公报中发布的时差数据为 UTC-GPS 以及 UTC-GLONASS 这 2 个值,缺少 BDT 数据,因此在本实验中只对 T 公报数据和实际计算的 GPS-GLONASS 时差数据进行比对。由于 T 公报中的时差数据 UTC-GPS 与 UTC-GLONASS 这 2 个值,因此需要将二者相减才能得到 GPS-GLONASS 的时差监测值。实测采用的数据为 IGS 九峰(JFNG)站 2017 年 10 月 27 日至 2017 年 12 月 5 日的的数据,计算流程如图 1 所示。由于 BIPM 的时差数据发布频率为每天一组,因此对于取实测数据的单天解的均值作为比较值。计算结果如图 5 所示,其中蓝色的“□”代表原始数据计算得到的系统时差值,红色的“o”代表利用相位平滑伪距后计算得到的系统时差值,粉色的“+”代表 BIPM 的时差数据。

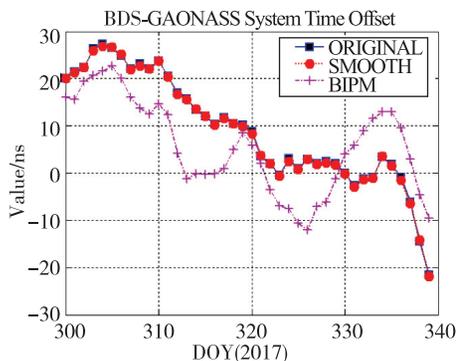


图 5 GPS-GLONASS 实测值与 BIPM T 公报值的对比

Fig. 5 Curve of GPS-GLONASS time offset and BIPM T bulletin

由于 BIPM 公布的 GPS-GLONASS 时差值是由 UTC-UTC(USNO)_GPS 和 UTC-UTC(SU)_GLONASS 相减得到,而实测值是利用空间信号方法直接接收卫星信号计算得到,所以实测值与

BIPM 的公报值并不完全一致^[11-12],并且由于本文采用了 IGS 的公开数据进行测试,对于测站中的线缆及接收机等部分的延迟并不能准确获取。因此,在本文中只对实测值与 BIPM 公报值的变化趋势进行比较以验证本文提出算法的有效性。在图 5 中,采用相位平滑伪距前后的实测值与 BIPM 的公报值在变化趋势上均保持一致,证明本文提出的基于相位平滑伪距的时差监测方法是可靠的。

5 结论

本文提出了一种基于相位平滑伪距的时差监测方法,利用该方法对同一测站不同时段以及同一时段不同测站的观测数据分别进行处理,结果显示利用相位平滑伪距的方法能够将 BDS-GPS 与 BDS-Galileo 这 2 个系统时差值的标准差降低至 2ns 以内,能够有效降低观测噪声对时差监测的影响。在与 BIPM 公报值的比较中,实测的 GPS-GLONASS 系统时差值也能与公报值保持一致。以上实验现象表明本文提出的基于相位平滑伪距的时差监测方法可以有效抑制观测噪声及多径效应对时差监测的影响。

随着全球四大卫星导航系统的逐步建成与完善,GNSS 各个系统间的时差监测具有重要意义。为进一步提高实时时差监测值的精度,可以考虑采用实时精密单点定位的技术。由于定时接收机的硬件时延也是影响时差监测的重要部分,如何提高时延标校的精度也需要进行更加深入的研究。

参考文献

- [1] Zhang H, Zhu L, Li X, et al. GNSS system time offset monitoring at NTSC [C]//2014 IEEE International Conference on Frequency Control Symposium (FCS). IEEE, 2014: 417-421.
- [2] 张雪,张慧君,李孝辉. GNSS 系统时间偏差的确定及其对定位结果的影响[J]. 时间频率学报, 2014, 37(1):57-64.
- [3] Jiao Y, Kou Y, Xu D. Multi-GNSS system time offset determination and its effect on positioning performance[C]//2012 Proceedings of the China Satellite Navigation Conference (CSNC). Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 407-416.
- [4] 于碧云. Galileo 系统时差监测方法研究与实现[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [5] 朱琳. GNSS 系统时差单站和多站联合监测方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.

- [6] Huang G, Zhang Q, Fu W, et al. GPS/GLONASS time offset monitoring based on combined Precise Point Positioning (PPP) approach[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(12): 2950-2960.
- [7] 孙广, 李双钦, 郭美军, 等. 不同 GNSS 的单站时差监测评估[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(6): 80-85.
- [8] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2015, 45(7): 079508.
- [9] 张成军, 杨力, 陈军. 提高 GPS 载波相位平滑伪距定位精度的算法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(4): 106-110.
- [10] Zhang H, Zhu L, Li X, et al. A method of GNSS system time offset monitoring[C]//2013 Joint of the European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC). *IEEE*, 2013: 838-842.
- [11] Píriz R, García Á M, Tobias G, et al. GNSS interoperability: offset between reference time scales and timing biases[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): 87-102.
- [12] Zhu F, Li X, Fan D. Evaluation of GNSS timing performance based on circular T and analysis of system time offset[C]//2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). *IEEE*, 2013: 776-780.