

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.013

## 不同 GNSS 的单站时差监测评估

孙 广, 李双钦, 郭美军, 翟 伟, 洪英杰, 张 敏

(西安航天天绘数据技术有限公司, 西安 710054)

**摘 要:**随着 GPS、GLONASS 导航系统的不断完善和更新,以及后续 GALILEO、BDS 等系统的逐步建立,多系统组合导航成为 GNSS 当前研究热点。为了实现不同 GNSS 系统之间的兼容和互操作,准确确定不同系统间时差是关键。基于此,利用天宝 R9 多模双频接收机输出的 GNSS 观测数据、导航电文以实现监测 GNSS 系统的时差。由于国际计量局(BIPM)T 公报缺少 BDS 相关数据,只对 GLONASS 和 GPS 实测的时差数据和 BIPM T 公报中对应的时差数据进行评估,统计了 BDS、GPS 和 GLONASS 三系统时差数据的最大值、最小值、均值、标准差、均方根误差。利用 2016 年 1 月到 10 月的连续时差数据进行时差监测评估,结果表明:GLONASS 与 GPS 时差与 T 公报结果的残差标准差为 4.28ns,北斗与 GPS、GLONASS 系统时差的标准差最优可达到 4ns 和 5ns。

**关键词:**系统时差;GNSS;监测评估;BIPM

中图分类号:TN697.1

文献标志码:

文章编号:2095-8110(2017)06-0080-06

## Monitoring and Evaluation on the Single Station Time Offset on the GNSS Data of Difference

SUN Guang, LI Shuang-qin, GUO Mei-jun, ZHAI Wei, HONG Ying-jie, ZHANG Min

(Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Corporation, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the improvement and updating of GPS and GLONASS and the gradual establishment of GALILEO and BDS navigation system, Multi-system GNSS navigation systems have become hot spot. In order to achieve the compatibility and interoperability among the different GNSS systems, it is the key to accurately determine the time difference between different systems. Based on this, the GNSS observation data output by the Trimble R9 multi-mode dual-band receiver and the GNSS system's navigation message are used to monitor the time difference between different GNSS. Because there is no BDS data in the BIPM T bulletin, the data of the measured time difference of GLONASS and GPS and the corresponding time difference data of BIPM T bulletin are used to be evaluated. For BDS, GPS and GLONASS, the maximum, minimum, mean, mean square error, RMSE of their time difference data are taken into account statistically. Time difference evaluation and monitoring is carried out based on time difference data from January to October 2016. The results show that the residual standard deviation between time difference of GLONASS, GPS and the results of T bulletin is 4.28ns, and the residual' standard deviation between BDS with GPS and GLONASS can reach 4ns or 5ns in optimal conditions.

**Key words:** System time difference; GNSS; Monitoring and evaluation; BIPM

收稿日期:2017-05-10;修订日期:2017-06-22

基金项目:地理信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLGIE2015-M-1-4)

作者简介:孙广(1986-),男,工程师,主要从事 GNSS 数据处理方面研究。E-mail:sunguang216@163.com

## 0 引言

当前 BDS 服务于亚太地区, 欧盟的 GALILEO 也正在建立, 多模卫星导航已成为当前热点。多模卫星导航是利用不同导航系统进行联合导航, 实现优势互补, 可在一定程度上提高导航精度<sup>[1]</sup>。

不同的 GNSS 导航系统均有自身的时间系统, GPS 系统时为 GPST, 溯源至美国海军天文台的协调世界时; GLONASS 系统时为 GLONASST, 溯源至俄罗斯的协调世界时; Galileo 系统时为 GST<sup>[2-5]</sup>, 采用欧洲几个时间实验室的 UTC 综合计算作为其时间基准; 北斗系统时为北斗时(BDT), 是由北斗地面控制站的钟组产生, 并溯源至 UTC (NTSC)<sup>[6]</sup>。不同的系统间会有时间偏差, 实现多模卫星导航的基础是对不同系统的时间进行统一。

由于系统时间偏差会对定位、测速和定时产生影响, 会导致多模导航达不到预期的精度, 所以对系统间时差的研究是有必要的。系统时间偏差监测方法主要有两种, 分别为系统级和用户级<sup>[7]</sup>。

本文利用系统级监测方法, 通过多模接收机获取的伪距观测量分别解算本地时与 BDS 系统、GLONASS 系统以及 GPS 系统的时差, 最后对三系统时差进行性能评估。

## 1 时差监测原理

本文采用空间信号法进行时差监测, 利用一个监测站(单站)的单模/多模接收机获取 GNSS 系统的空间信号, 最后利用导航定位原理对系统的时间偏差进行解算, 监测原理如图 1 所示, 用相关算法即可解算出三系统的系统时差<sup>[7-9]</sup>。

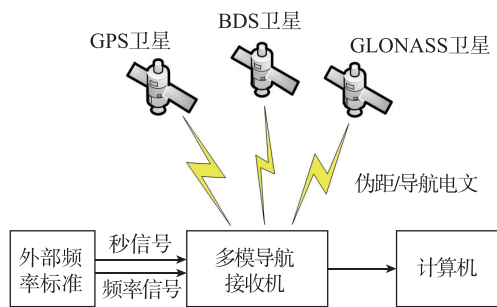


图 1 时差监测示意图

Fig. 1 Diagram of time difference monitoring

伪距观测量方程如式(1)所示

$$P = \rho + cdt_t - cdt_s + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion} +$$

$$d_{mult} + d_{cha} + d_{ode} + \epsilon \quad (1)$$

式中,  $P$  是伪码距观测量,  $\rho$  是测站与卫星距离,  $cdt_t$  是接收机钟差改正,  $cdt_s$  是卫星钟钟差改正,  $d_{orb}$  是卫星轨道误差,  $d_{trop}$  是对流层误差,  $d_{ion}$  是电离层误差,  $d_{mult}$  是多路径时延,  $d_{cha}$  是接收机通道时延,  $d_{ode}$  是电缆参考时延,  $\epsilon$  是伪距测量噪声。通过伪距观测量和导航电文可计算获取接收机钟差, 如式(2)

$$dt_r = \frac{p - \rho}{c} + dt_s - \frac{d_{trop} + d_{ion}}{c} - \frac{d_{cha} + d_{ode}}{c} - \frac{d_{mult} + d_{orb} + \epsilon}{c} \quad (2)$$

假设 GPS、GLONASS、BDS 的导航电文和伪距观测量获得接收机钟差分别为 REFG、REFR、REFC, 由此可用式(3)计算两系统的时差:

$$\begin{cases} T_{CG} = REFG - REFC \\ T_{CR} = REFR - REFC \\ T_{RG} = REFG - REFR \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $T_{CG}$ 、 $T_{CR}$ 、 $T_{RG}$  分别为 BDT 与 GPST 的时差、BDT 与 GLONASST 的时差、GLONASST 与 GPST 的时差。

## 2 误差模型

GNSS 系统时差监测中主要误差项有: 卫星钟差、卫星星历误差、相对论效应、地球自转效应、电离层时延、对流层时延、电缆时延和多路径效应。

### (1) 卫星钟差

以 BDS 系统为例, BDT 在  $t$  时刻的卫星钟差<sup>[6]</sup>为式(4)

$$\Delta t_{sv} = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \quad (4)$$

式中,  $a_0$  是初始时刻卫星时钟相位偏差,  $a_1$  是初始时刻卫星时钟频率偏差,  $a_2$  是卫星时钟频率漂移,  $t$  是信号发射时刻的 BDT, 由信号发射时刻的卫星测距码相位时间代替,  $t_{oc}$  是卫星钟数据的参考时间。

对于 B1I 信号的用户, 还需要使用进一步修正, 如式(5)所示

$$(\Delta t_{sv})_{B1I} = \Delta t_{sv} - T_{gd1} \quad (5)$$

式中,  $T_{gd1}$  为星上设备时延差, 可由卫星导航电文获得。

### (2) 卫星星历误差

与卫星钟误差修正相同, 通过主控站对卫星位置最佳预测值进行拟合, 上传至卫星, 以导航电文的形式播发给用户<sup>[7]</sup>。

### (3) 相对论效应

由于卫星钟和地面钟所处的运动状态和受力不同,会使卫星钟和地面钟产生相对偏差,对相对论效应修正的计算公式如式(6)所示

$$\Delta t_r = Fe \sqrt{A} \sin E \quad (6)$$

式中,  $e$  为卫星轨道偏心率,  $A$  为轨道长半轴,  $E$  为由星历参数数据计算得到的偏近点角,  $F$  为常数,  $F = 4.442807633 \times 10^{-10} \text{ s}/\sqrt{\text{m}}$ 。

### (4) 地球自转效应

由于地球自转会引起接收时刻和发射时刻卫星位置的相对论误差,考虑 Sagnac 效应。卫星坐标改正公式为式(7)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) & 0 \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{sat}} \\ y_{\text{sat}} \\ z_{\text{sat}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $[x \ y \ z]$  表示修正后的卫星位置,  $\omega$  表示地球自转角速率,  $\tau$  表示卫星信号在空间中的传播时间。

### (5) 电离层时延改正

电离层时延改正采用双频伪距观测量的组合消除电离层时延,计算公式如式(8)

$$\rho = \frac{f_1^2 \rho_1 - f_2^2 \rho_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (8)$$

### (6) 对流层时延改正

通常利用包含气象参数的模型来估算对流层延迟。常用的改正模型有 Hopfield 和 Saastamoinen 模型,本文采用 Hopfield 模型进行修正。

## 3 实验结果分析

### 3.1 2016年时差波形

本文利用天宝 R9 多模接收机获取三系统的相关测试数据,接收机外接参考主钟的 1pps/10MHz 信号,选取接收机接收到的 2016 年 10 个月的 BDS、GPS、GLONASS 三系统相关数据,采用第 3 节中的各种误差模型进行修正,利用导航电文、伪距通过式(3)可获取 GPST、GLONASST 和 BDT 的系统间时差,实测时差数据间隔为 15min,通过中位数法剔除时差数据的粗差,最后应用 vondrak 进行滤波<sup>[10]</sup>。时差波形如图 2~图 4 所示,为 2016 年 1 月~10 月 GNSS 导航系统时差数据波形图,其中图 2 为 BDT 与 GPST 的时差波形,图 3 为 GLONASST 与 BDT 的时差波形,图 4 为 GLONASST 与 GPST 的时差波形,图中红色部分为滤波后的曲线图。

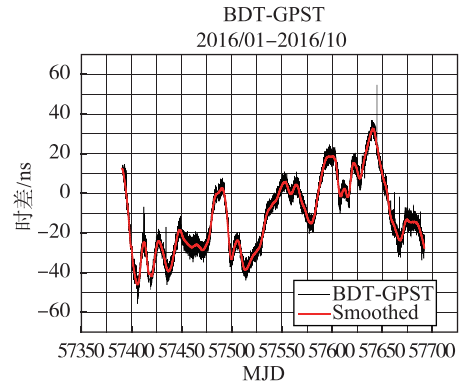


图 2 2016 年 1 月-10 月 BDT 与 GPST 时差波形  
Fig. 2 Curve of BDT and GPST time difference in 2016.01 to 2016.10

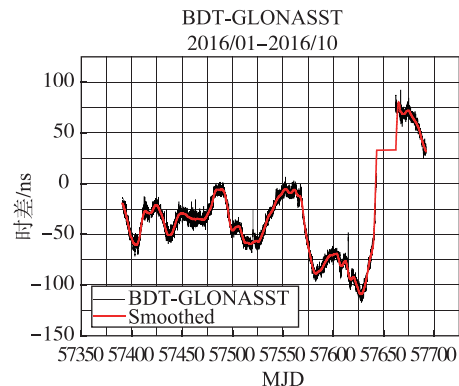


图 3 2016 年 1 月-10 月 BDT 与 GLONASST 时差波形  
Fig. 3 Curve of BDT and GLONASST time difference in 2016.01 to 2016.10

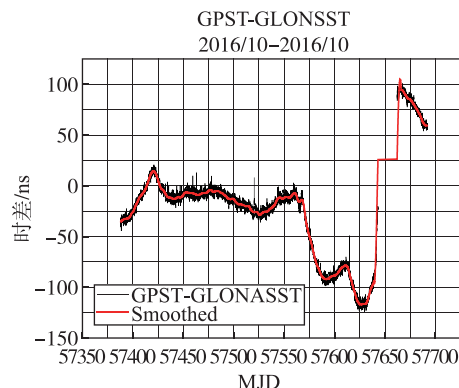


图 4 2016 年 1 月-10 月 GLONASST 与 GPST 时差波形  
Fig. 4 Curve of GLONASST and GPST time difference in 2016.01 to 2016.10

从图 2 中可以看出,测试数据中 BDT-GPST 时差在  $-60\text{ns} \sim 60\text{ns}$  之间变化,图 3 和图 4 中可以看出 2016 年 1 月~10 月 GLONASST-GPST、GLONASST-BDT 波形在  $-150\text{ns} \sim 100\text{ns}$  上下浮动,在

9 月份波形出现跳变。

### 3.2 统计结果分析

测试数据的统计结果如表 1 所示,表 1 中 RG 表示 GLONASST-GPST,CG 表示 BDT-GPST,RC 表示 GLONASST-BDT,统计了 2016 年 1 月~10 月 BDT、GLONASST、GPST 两两系统时差的最大值(MAX)、最小值(MIN)、平均值(MEAN)、标准差(STD)、均方根误差(RMS)和 95%置信度(Upper)。

用柱状图描述了各导航系统测试数据每月的变化情况,纵轴为测试数据标准差。如图 5~图 7 所示,从其中可以看出,GLONASST 与 GPST、BDT 的标准差除 9 月均优于 17ns。由于 9 月以后,GLONASST 数据整体出现向上跳变,GLONASST 与 GPST、BDT 标准差增大到 60ns,10 月份标准差恢复到 20ns 以内。从图 6 中可以看出,BDT 与 GPST 的标准差测试数据各月优于 17ns,标准差最好可达到 4ns。

表 1 2016 年 1 月-10 月 GNSS 时差统计结果

Tab.1 The statistical result of GLONASST and GPST time difference from 2016.01 to 2016.10

时间	时差序列	MAX/ns	MIN/ns	MEAN/ns	STD/ns	RMS/ns	95%Upper/ns
2016/01	RG	18.20	-44.55	-11.96	14.62	18.89	34.36
	CG	25.94	-55.71	-28.57	16.58	33.03	47.32
	RC	-5.59	-71.73	-41.09	14.20	43.48	63.10
2016/02	RG	20.85	-21.78	-6.84	9.01	11.31	16.52
	CG	-12.35	-48.50	-31.18	7.31	32.03	41.26
	RC	-13.14	-59.48	-38.06	10.71	39.55	53.64
2016/03	RG	12.70	-17.34	-7.11	3.15	7.77	12.07
	CG	-11.42	-34.84	-25.46	3.48	25.70	30.81
	RC	-12.83	-46.48	-32.52	4.84	32.88	40.08
2016/04	RG	1.84	-26.44	-12.91	5.26	13.94	21.13
	CG	7.76	-38.61	-17.51	12.47	21.50	33.71
	RC	1.63	-53.54	-30.57	16.24	34.61	48.44
2016/05	RG	7.89	-36.21	-24.21	4.06	24.55	30.89
	CG	-2.56	-43.94	-23.07	10.80	25.48	38.34
	RC	-22.39	-68.06	-47.11	11.77	48.56	61.69
2016/06	RG	2.89	-27.82	-12.29	4.79	13.19	21.53
	CG	10.95	-9.73	1.04	3.70	3.84	7.00
	RC	6.63	-33.74	-11.23	6.10	12.78	23.17
2016/07	RG	-22.29	-98.82	-79.70	17.71	81.65	94.53
	CG	24.70	-20.42	5.40	12.51	13.63	20.21
	RC	-27.62	-96.76	-74.33	12.37	75.36	88.79
2016/08	RG	-48.97	-124.24	-101.75	14.97	102.86	119.37
	CG	23.29	-10.44	8.62	6.83	11.00	17.84
	RC	-48.04	-117.50	-93.43	12.85	94.31	110.52
2016/09	RG	101.76	-119.45	33.40	74.39	81.54	106.32
	CG	54.55	-21.38	8.23	15.50	17.55	31.87
	RC	94.75	-106.04	41.51	62.76	75.25	90.04
2016/10	RG	100.95	72.73	86.27	6.56	86.54	96.38
	CG	0.56	-32.37	-17.17	4.56	17.77	25.20
	RC	92.43	56.12	69.08	4.90	69.27	76.59

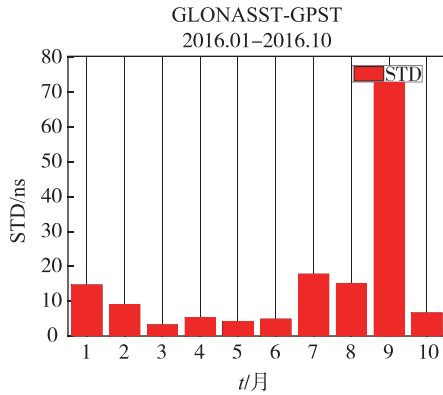


图5 2016年1月-10月GLONASST与GPST时差STD  
Fig. 5 STD curve of GLONASST and GPST time difference from 2016. 01 to 2016. 10

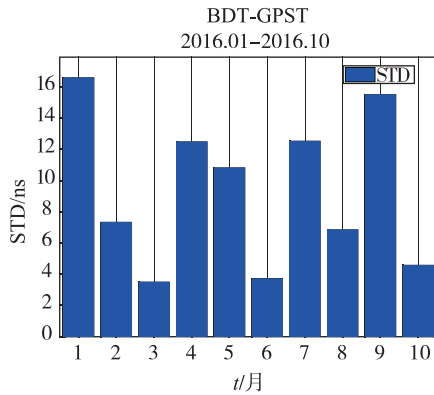


图6 2016年1月-10月BDT与GPST时差STD  
Fig. 6 STD curve of BDT and GLONASST time difference from 2016. 1 to 2016. 10

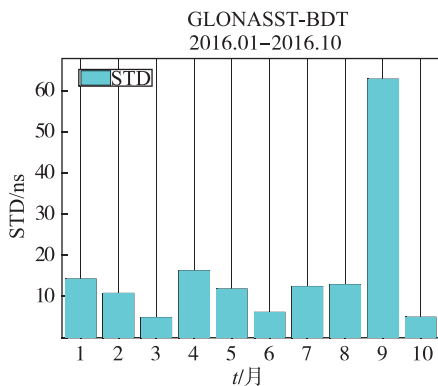


图7 2016年1月-10月GLONASST与BDT时差STD  
Fig. 7 STD curve of GLONASST and GPST time difference from 2016. 1 to 2016. 10

### 3.3 与BIPM结果比较

在BIPM网站下载T公报数据,其中每天一组数据UTC-GNSST。目前,T公报缺少BDT数据,本文只对比T公报数据和实测的GLONASST-

GPST时差数据,操作步骤如下。

1) T公报第五部分UTC-GLONASST与UTC-GPST两列时差序列作差,获得GLONASST-GPST;

2) 将从T公报获得时差序列与实测的时差序列作差,用T公报的真值来评估实测的GLONASST-GPST。

图8所示为GLONASST-GPST与T公报真值和实测值波形图,其中点画红线的为实测值,点画黑线为T公报真值。图9所示为T公报真值和实测值的残差曲线图。表2所示为残差结果各项具体参数。从表2中可以得出,GLONASST-GPST的监测结果与T公报结果绝对值最大值不超过13ns,标准偏差优于5ns。

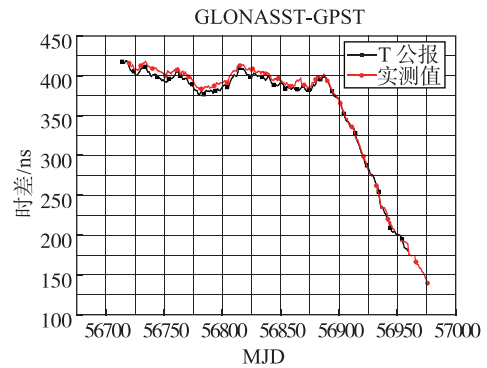


图8 GLONASST-GPST 实测值和T公报对比  
Fig. 8 Curve of GLONASST and GPST time difference, BIPM T bulletin

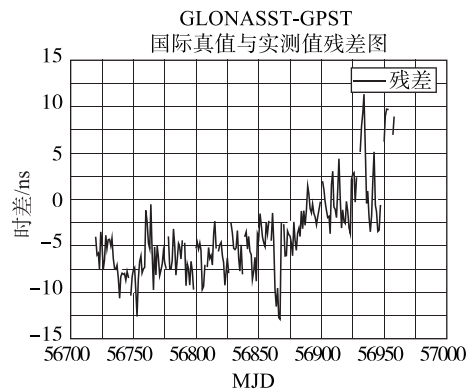


图9 GLONASST-GPST T公报值与实测值残差  
Fig. 9 The residual curve of GLONASST and GPST time difference, BIPM T bulletin

表2 GLONASST-GPST 残差统计结果

Tab. 2 The residual result of GLONASST and GPST time difference

时差类型	MAX/ns	MIN/ns	MEAN/ns	STD/ns
残差值	11.35	-12.9	-3.98	4.28

## 4 结论

本文介绍了GNSS时差监测的原理和各种误差修正模型,分析了2016年1月~10月BDT、GPST、GLONASST三系统时差各项指标,分析结果显示,由于GLONASST在9月出现跳变,BDT与GPST、GLONASST标准差除9月外,均优于17ns。用BIPM T公报时差结果对实测的GLONASST-GPST时差序列进行评定,评定结果显示,监测结果与T公报结果绝对值最大值不超过13ns,标准差优于5ns,表明本文方法进行时差监测是可行的。

时差监测是一项非常有意义的工作,对于用户进行多模导航具有辅助的作用<sup>[11]</sup>。本文中时差监测的算法是基于伪距的,若要提高监测结果的精度,可利用载波相位平滑伪距或非差相位数据进行时差监测。

### 参考文献

- [1] 吴海涛,李孝辉,卢晓春,等. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [2] 杨元喜,陆明泉,韩春好. GNSS互操作若干问题[J]. 测绘学报,2016,45(3):253-259.
- [3] Galluzzo G, Mudrak A, Binda S, et al. GGTO and UTC dissemination results in the GIOVE-mission[C]//European Frequency and Time Forum Meeting, 2010.
- [4] Allan D W, Thomas C. Technical directives for standardization of GPS time receiver software[J]. Metrologia, 1994,31(1):69-79.
- [5] Hahn J H, Powers E D. Implementation of the GPS to Galileo time offset [C]//Proceedings of the 2005 Joint IEEE International Frequency Control Symposium and Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Vancouver, Canada, 2005:33-212.
- [6] 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.
- [7] 李晓瑞. 单站GPST/GLONASST实时监测与预报研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
- [8] 于合理,郝金明,刘伟平,等. 附加原子钟物理模型的PPP时间传递算法[J]. 测绘学报,2016,45(11):1285-1292.
- [9] 刘晓刚,吴晓平,张传定. 卫星双向共视法时间比对计算模型及其精度评估[J]. 测绘学报,2009,38(5):415-421.
- [10] 王宁波,袁运斌,张宝成,等. GPS民用广播星历中ISC参数精度分析及其对导航定位的影响[J]. 测绘学报,2016,45(8):919-928.
- [11] 田力,陈俊平,裴霄,等. GNSS时差及其在多系统组合定位中的应用[J]. 测绘通报,2012(10):45-47.