

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-02-0121-09

守时实验室 iGMAS 站接收机钟差分析与时延相对校准

王然^{1,2,3}, 杨旭海^{1,2,3}, 孙保琪^{1,2,3}, 杨海彦^{1,2}, 张喆^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: GNSS (Global Navigation Satellite System) 接收机时延的稳定性及准确度对基于国际 GNSS 监测评估系统 (iGMAS) 跟踪站的授时性能评估、时间传递等具有重要影响。iGMAS 永久跟踪站 BRCH 和测试跟踪站 XIA3 与 XIA5, 分别位于两个国际重要守时实验室德国联邦物理技术研究院 (PTB) 和中国科学院国家授时中心 (NTSC)。以参与 UTC 国际时间比对的接收机 PTBB 和 NTP1 为参考, 基于 GPS 观测数据, 采用 PPP 时间传递的方法, 对 BRCH, XIA3 和 XIA5 3 台 iGMAS 接收机的钟差长期稳定性进行了分析。作为对照, 同时分析了并址的 PT11, XIA4 和 XIA6 等 3 台商用授时型接收机。结果表明: ① 3 台 iGMAS 接收机的时延均具有较好的长期稳定性, 不存在大幅度的系统性变化; ② BRCH 接收机时延 300 d 稳定度优于 0.3 ns, 与 PT11 相当; ③ XIA3 与 XIA5 接收机时延存在 2 ns 左右的单天起伏, 可通过并址且共天线的 XIA4、XIA6 进行校准。基于 BIPM TAIPPP 结果, 对 BRCH, XIA3 和 XIA5 接收机的总时延进行了相对校准。论文相关结果可为后续基于 iGMAS 跟踪站的授时监测、时间传递及其他时间频率服务提供参考。

关键词: iGMAS; 协调世界时 (UTC); 精密单点定位; 接收机时延; 相对校准

Clock analysis and delay calibration of iGMAS receivers at time-keeping laboratory

WANG Ran^{1,2,3}, YANG Xu-hai^{1,2,3}, SUN Bao-qi^{1,2,3}, YANG Hai-yan^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The stability and accuracy of the GNSS receiver delay have an important impact on the timing performance evaluation and time transfer of the international GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS) tracking stations. The iGMAS permanent tracking station BRCH is located at the German Federal Institute of Physics and Technology (PTB) and two test tracking stations XIA3 and XIA5 are located at the Xi'an Campus of the National Time Service Center (NTSC) of the Chinese Academy of Sciences. The time-delay stability of the three iGMAS receivers, i.e., BRCH, XIA3 and XIA5, was analyzed by PPP time transfer method

收稿日期: 2019-11-18; 接受日期: 2019-12-10

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”B类资助项目(XAB2018B19)

作者简介: 王然, 女, 硕士, 主要从事高精度时间传递与精密测定轨研究。

using the GPS observation data by taking the receivers PTBB and NTP1, participated in the UTC international time comparison, as reference. Three commercial timing receivers such as PT11, XIA4, and XIA6 are simultaneously analyzed for comparison. The results indicate that: ① The delay of the three iGMAS receivers shows good long-term stability, without significant systematic change. ② The 300-day stability of BRCH receiver is, better than 0.3 ns, which is equivalent to PT11. ③ The one-day fluctuation of XIA3 and XIA5 receivers are about 2 ns, which can be calibrated by the co-antenna receivers XIA4 and XIA6. The total delay of the BRCH, XIA3, and XIA5 receivers is calibrated using the BIPM TAIPPP results. The results of this paper can be useful for subsequent timing monitoring, time transfer and other time-frequency services with iGMAS tracking stations.

Key words: international GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS); coordinated universal time (UTC); precise point positioning; receiver delay; relative calibration

0 引言

国际 GNSS (Global Navigation Satellite System) 监测评估系统 (international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS) 通过布设全球 GNSS 连续运行跟踪站网, 对北斗/GPS/GLONASS/Galileo 四大卫星导航系统的导航、定位、授时服务性能进行监测评估^[1]。在 iGMAS 规划建设的 30 个跟踪站中, 有 2 个跟踪站分别位于德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 和中国科学院国家授时中心 (National Time Service Center, NTSC)^[2]。PTB 和 NTSC 均为国际重要的守时实验室, 而且 PTB 是协调世界时 (coordinated universal time, UTC) 国际时间比对中心节点。基于守时实验室的 iGMAS 站接收机, 可以开展北斗/GNSS 授时性能监测、时间传递等时间服务工作。GNSS 接收机设备时延的稳定性及准确度对于上述时间服务工作具有重要影响。

文献[3]对 GNSS 接收机时延的长期稳定性进行了分析, 文献[4]和文献[5]分别对 Galileo 系统和 BDS 系统各频点的硬件时延进行校准。但是, 对 iGMAS 站接收机的时延稳定性分析及校准尚未见相关报道。本文的主要工作是, 对位于两个守时实验室的 iGMAS 站接收机进行钟差分析和时延校准。分别在 PTB 守时实验室和 NTSC 守时实验室搭建试验平台, 采用精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 的方法, 计算 iGMAS 站接收机的长期钟差, 并以参与国际时间比对的 PTBB 站和 NTP1 站作为比较参考。最后将各台 iGMAS 接收机进行相对校准, 为后期基于 iGMAS 站的时间服务试验提供参考。

1 数据与方法

本节对试验平台、解算策略及评价方法进行详细介绍。

1.1 试验平台

试验用到的 GNSS 接收机均外接由守时实验室钟房产生的 UTC 信号。其中, PTBB 外接 UTC (PTB) 信号, 位于 PTB 守时实验室钟房内, 是参与 BIPM (国际权度局) 国际原子时计算的接收机, BRCH 是 iGMAS 接收机, 与 PT11 共同位于距离 PTB 钟房约 283 m 的机房内, 其参考频率由 UTC (PTB) 主钟输出频率经过同一个频率分配放大器产生。位于 NTSC 守时实验室的 iGMAS 测试接收机(未正式参与 iGMAS 监测评估) XIA3, XIA5 和商用授时接收机 XIA4, XIA6 放置在距离 NTSC 钟房 95 m 的 CAPS 机房内, 参考频率由 UTC (NTSC) 主钟输出频率经过同一个频率分配放大器产生, 4 台接收机通过功分器连接同一天线, 为零基线模式。NTP1 外接 UTC (NTSC) 信号, 位于钟房内, 是参与 BIPM 国际原子时计算的接收机。各台接收机连接情况如图 1 和图 2 所示。试验选取的站点所用的接收机型号、天线配置及外接时频信号情况详见表 1。

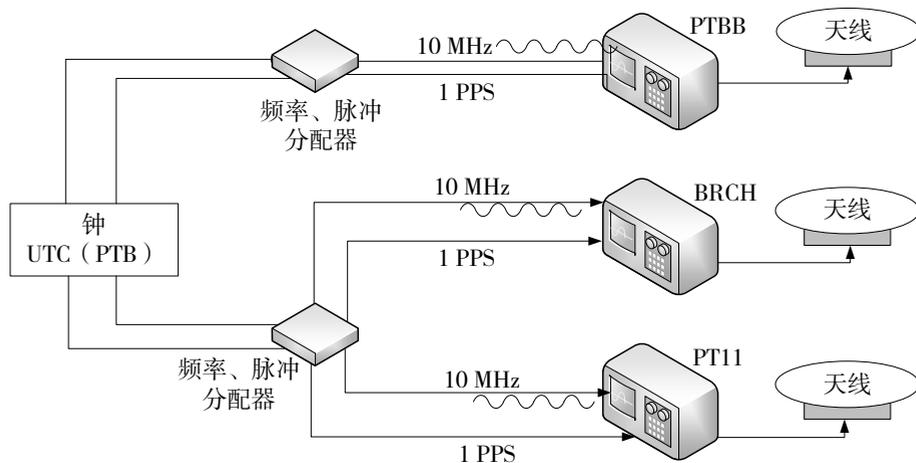


图 1 PTB 守时实验室接收机连接示意图

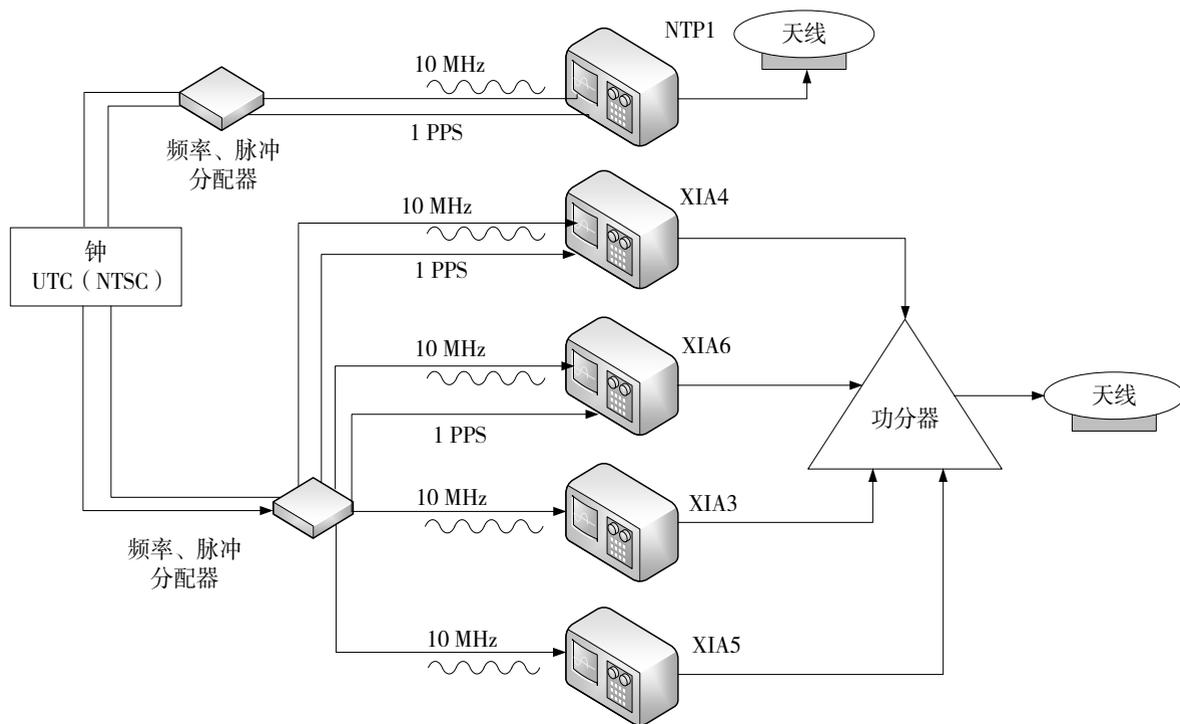


图 2 NTSC 守时实验室接收机连接示意图

表 1 接收机配置信息

站点	接收机	天线 (扼流圈)	外接信号
PTBB	ASHTECH Z-XII3T	ASH700936E	UTC(PTB)
PT11	SEPT POLARX4TR	LEIAR25.R4	UTC(PTB)
BRCH	CETC-54-GMR-4011	NOV750.R4	UTC(PTB)
NTP1	SEPT POLARX4TR	SEPCHOKE_MC	UTC(NTSC)
XIA3	CETC-54-GMR-4016	TRM59900.00	UTC(NTSC)
XIA4	SEPT POLARX5TR	TRM59900.00	UTC(NTSC)
XIA5	CETC-54-GMR-4011	TRM59900.00	UTC(NTSC)
XIA6	SEPT POLARX5TR	TRM59900.00	UTC(NTSC)

1.2 解算策略

数据处理采用中国科学院国家授时中心 iGMAS 分析中心自主改编的 Bernese 5.2 软件,从国际 GNSS 服务 (IGS) 数据中心下载相应时段的 IGR 快速产品,包括精密轨道和钟差等产品,基于 PPP 方法解算得到各站接收机钟差^[6-7]。表 2 列出了 Bernese 5.2 软件 PPP 方法详细的处理策略。

表 2 Bernese 5.2 软件 PPP 时间传递解算策略

误差项	改正模型
对流层延迟	GMF, 干分量模型改正; 湿分量参数估计
观测值定权	$1/\cos^2 Z$, 码和载波相位权比: 1:100
固体潮、海潮、极移改正	IERS 2010
相位缠绕	Wu model
截止高度角	3°
卫星 PCO, PCV 影响	igs08-1861.atx
观测值采样间隔	30 s

BIPM 每月公布各守时实验室接收机的 GPS PPP 钟差结果,使用的是由加拿大自然资源局 (Natural Resources Canada) 开发的 NRCAN-PPP 软件,解算策略与 Bernese 5.2 软件基本一致^[8]。区别是参数估计方法中, NRCAN-PPP 使用的是卡尔曼滤波,而 Bernese 5.2 软件使用最小二乘法。

1.3 评价方法

本文通过计算钟差外符合比较结果的 STD (standard deviation) 值,来表示接收机时延的稳定度,即 A 类不确定度。具体计算公式如下:

$$\sigma_{\text{STD}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (1)$$

式 (1) 中, x_i 表示样本值, N 为时间序列采样点个数, μ 表示样本均值。

2 结果与分析

利用参试接收机 2018 年的 GPS 观测数据进行 PPP 解算,得到同一守时实验室多台接收机之间的相对钟差。因为外接同源时频信号,这些接收机属于共钟模式,其相对钟差能够反映接收机 (含天线及电缆) 时延的稳定性。在此基础上,借助 PTBB 和 NTP1 接收机的已知校准值,对 iGMAS 接收机时延进行相对校准。

2.1 iGMAS 接收机时延稳定性分析

本节从 PTB 守时实验室和 NTSC 守时实验室的接收机时延角度进行稳定性分析。

2.1.1 PTB 守时实验室 iGMAS 接收机时延稳定性分析

对 2018 年第 1~300 天期间的 PTBB, PT11 和 BRCH 3 台接收机的 GPS 单系统观测数据进行 PPP 计算,得到钟差时间序列。解算过程中使用的卫星轨道和钟差是 IGS 的快速产品 (IGR)。其中, PTBB 和 PT11 观测数据从 PTB 服务器下载, BRCH 观测数据从 iGMAS 西安数据中心下载。

PTBB 是参与 BIPM 国际时间比对的测站,将其钟差序列作为参考标准,将 iGMAS 站 BRCH 的钟差结果与其进行比对。由于 PPP 解算的测站钟差均以 IGRT 作为参考基准,将 PTBB 站与 BRCH 站的钟差

直接相减, 获得 PTBB 站与 BRCH 站的相对钟差, 分析其稳定性。PT11 作为检核站, 与 BRCH 和 PTBB 进行比对, 通过 3 条比对链路比较分析 iGMAS 接收机时延长期稳定性。

图 3、图 4 和图 5 依次给出了 BRCH-PTBB、PT11-PTBB、BRCH-PT11 3 条比对链路在 2018 年第 1~300 天的相对钟差序列, 表 3 给出了 3 条比对链路的统计结果。3 条比对链路的总体变化趋势是一致的, BRCH, PT11 与 PTBB 比对结果的 STD 分别是 0.296 ns 和 0.270 ns, 结果接近。3 条比对链路的 STD 均小于 0.33 ns, 说明测站时延长期稳定性较好。3 条比对链路组成闭合三角形, 其均值之和为 -0.22 ns (闭合差)。

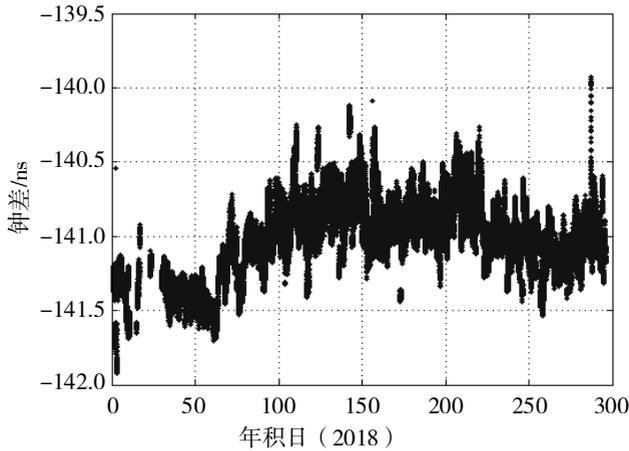


图 3 BRCH-PTBB 链路钟差结果

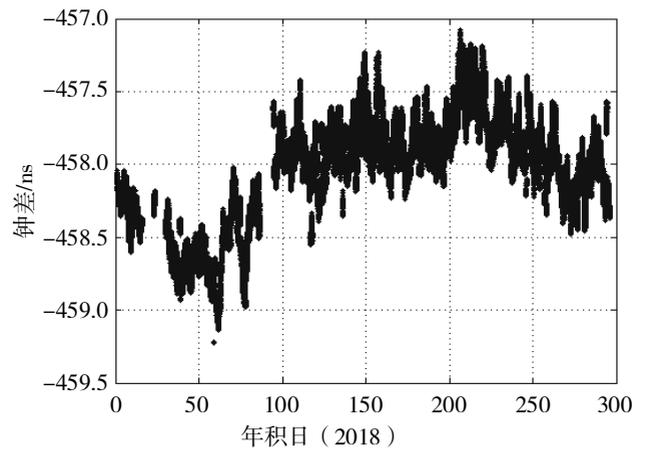


图 4 PT11-PTBB 链路钟差结果

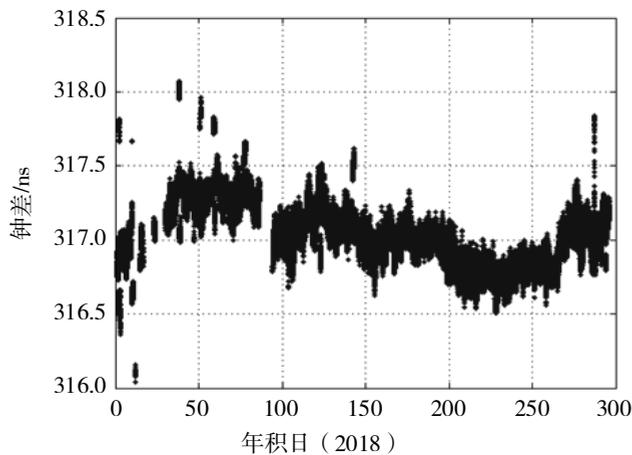


图 5 BRCH-PT11 链路钟差结果

表 3 PTB 接收机链路钟差结果统计值 单位: ns

链路	标准差 (STD)	均值
BRCH-PTBB	0.296	-140.80
PT11-PTBB	0.270	458.05
BRCH-PT11	0.327	317.03

2.1.2 NTSC 守时实验室 iGMAS 接收机时延稳定性分析

使用 iGMAS 测试接收机 XIA3, XIA5 和商用授时接收机 XIA4, XIA6, 2018 年第 250~290 天的 GPS 观测数据, 基于 IGR 卫星轨道和钟差产品分别计算了 4 站连续的 PPP 钟差。NTP1 站参与 BIPM 国际时间比对, 其钟差序列来自 BIPM 提供的 GPS PPP 钟差解算文件, 作为参考标准与 iGMAS 测试接收机进行比对。图 6 给出了上述 5 站的 PPP 钟差序列。可以看出, 5 站钟差序列变化总体趋势一致, 变化范围

约为 11 ns。但 XIA3 和 XIA5 站的噪声明显大于其他 3 个测站,且存在较小的天周期项变化,初步判断是因为这两台接收机对温度变化较为敏感。

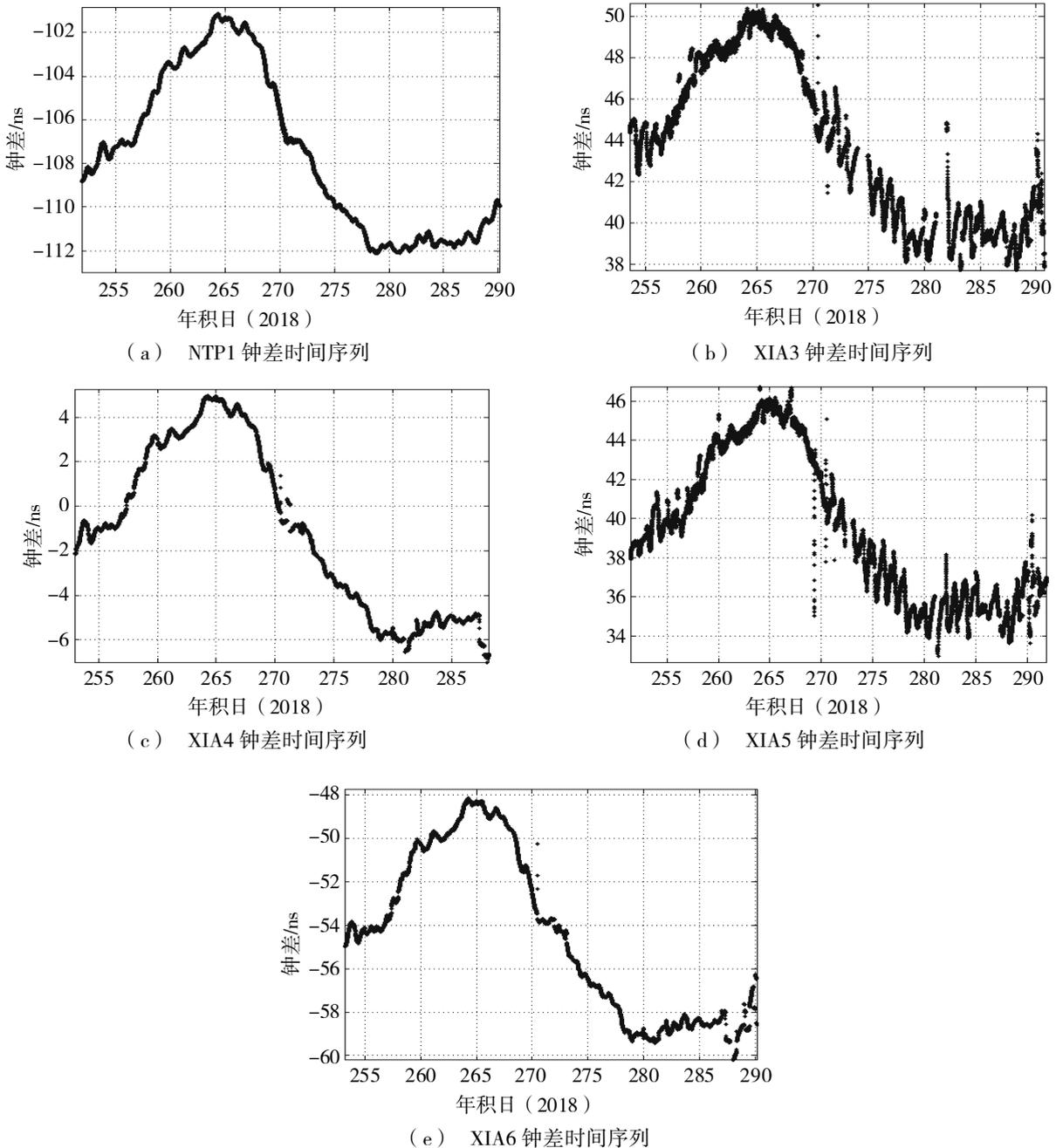


图 6 NTP1, XIA3, XIA4, XIA5, XIA6 接收机钟差时间序列图

将 NTP1 作为参考站, iGMAS 接收机与其形成 4 条比对链路, 图 7 至图 10 依次给出了 NTP1 与 XIA3, XIA4, XIA5 和 XIA6 比对钟差序列, 表 4 给出了比对链路的统计结果。从中可以看出, 链路 NTP1-XIA4 和 NTP1-XIA6 的 STD 明显小于链路 NTP1-XIA3 和 NTP1-XIA5, 主要是由于 XIA3 和 XIA5 的钟差噪声相对较大引起。NTP1-XIA3 的均值与 NTP1-XIA5 较为接近, 得益于两台接收机使用了相同的硬件与连接电缆, 只是软件版本略有不同。XIA4 与 XIA6 使用同类型的接收机, 但 NTP1-XIA4 的均值与 NTP1-XIA6 有较大差异, 初步确定由于两台接收机不是同批次采购, 硬件可能存在差异。从 40 d 的统计结果看, 各站与 NTP1 接收机链路钟差 STD 均小于 0.5 ns, 在合理范围内^[9]。因此, NTSC 守时实验室的 iGMAS 测试接收机可以为后期的授时服务提供参考, 但其性能需要进一步提升。

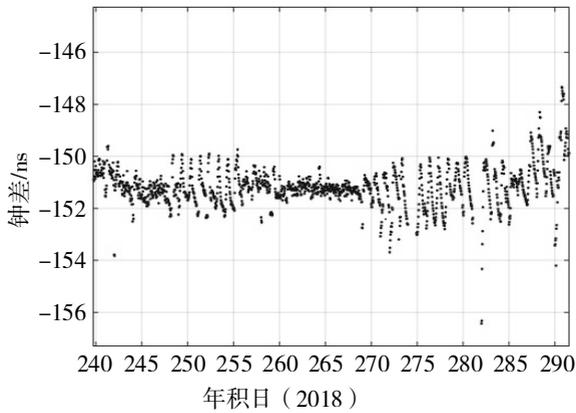


图 7 NTP1-XIA3 链路钟差

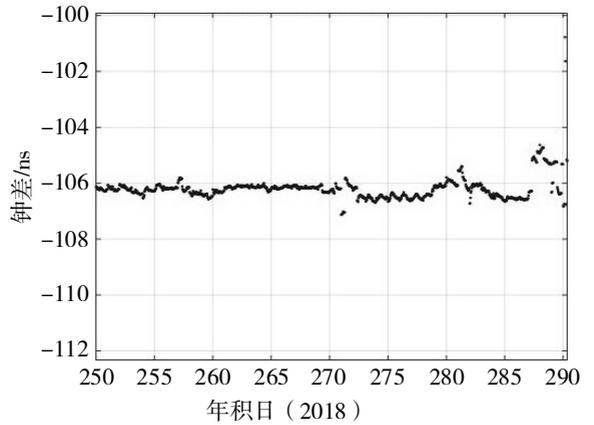


图 8 NTP1-XIA4 链路钟差

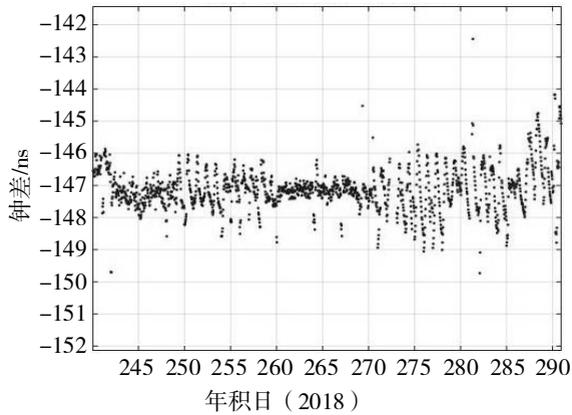


图 9 NTP1-XIA5 链路钟差

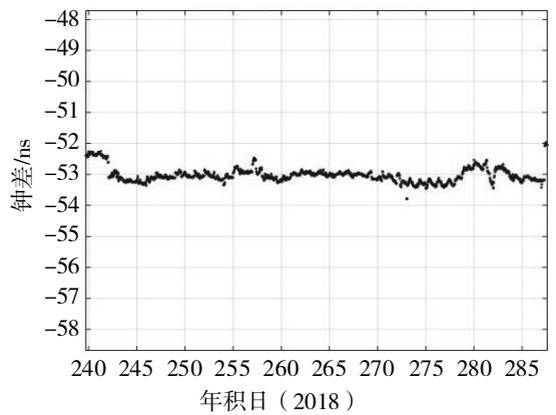


图 10 NTP1-XIA6 链路钟差

表 4 NTSC 接收机链路钟差结果统计值 单位: ns

链路	标准差 (STD)	均值
NTP1-XIA3	0.46	-149.94
NTP1-XIA4	0.32	-106.78
NTP1-XIA5	0.49	-146.96
NTP1-XIA6	0.27	-52.97

2.2 iGMAS 接收机校准

在前文的分析计算中, 同类型、不同类型接收机时延可能存在较大差异, 需要对每台接收机进行时延校准。国内外常用的校准方法有绝对校准和相对校准^[10]。本文基于 BIPM 提供的 PTBB 和 NTP1 的站钟差数据和接收机时延等信息, 通过共钟比对的方式对 iGMAS 接收机与 iGMAS 测试接收机进行时延校准。时间比对中接收机时延可以用如下公式表示^[11]:

$$\text{TOT DLY} = \text{CAB DLY} + \text{INT DLY} - \text{REF DLY}, \quad (2)$$

$$\text{CAB DLY} = X_C, \quad (3)$$

$$\text{REF DLY} = X_P + X_O, \quad (4)$$

$$\text{INT DLY} = X_S + X_R, \quad (5)$$

式 (2) 至 (5) 中, TOT DLY 为接收机总延迟, 其中, CAB DLY 是电缆延迟 (CABLE DELAY) 的缩写, 是指从天线输出端到接收机 GPS 信号输入端的时延值, 与电缆长度和材质有关, 与信号类型无关。REF

DLY 是参考延迟 (REFERENCE DELAY) 的缩写, 表示从 UTC(k) 的时间参考点到接收机输入端的时延值, 与信号类型无关。INT DLY 是内部延迟 (INTERNAL DELAY) 的缩写, 与天线和接收机收到的卫星系统和信号类型有关。双频消电离层组合信号内部延迟的计算见式 (6)。其中, T_1 和 T_2 分别表示 GPS 两个频点的时延值, f_1 和 f_2 表示对应频点的频率值。

$$d_{\text{INT}} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 T_1 - f_2^2 T_2) \quad (6)$$

BIPM 给出了参与国际时间比对的守时实验室接收机的时延校准信息, 表 5 给出了从 BIPM 提供文件中提取的 NTP1 和 PTBB 两站接收机时延数据。

表 5 BIPM 文件中给出的延迟参数和计算得到的总延迟 单位: ns

站名	CAB DLY	REF DLY	INT DLY (GPS P1)	INT DLY (GPS P2)	TOT DLY
NTP1	209.0	373.8	55.7	55.1	-108.17
PTBB	301.7	73.9	304.5	319.8	508.73

计算 NTP1 和 PTBB 接收机总延迟之后, 以这两台接收机作为参考, 对参与试验的 iGMAS 接收机进行校准, 如图 11 所示。校准公式如式 (7) 和式 (8) 所示。图 11 中, X_C 是接收机 CAB DLY, $X_S + X_R$ 是接收机 INT DLY, $X_P + X_O$ 是接收机 REF DLY。参考接收机和被校准接收机均连接相同的 UTC(k) (k 为时间实验室缩写) 信号。第一步, 使用 GPS PPP 对每台接收机进行钟差解算, 获得式 (7) 中的 T_{PPP} 。再对两台接收机进行 GPS PPP 时间传递, 所得链路钟差结果均值即为式 (8) 中的 $T_{\text{PPP1}} - T_{\text{PPP2}}$, 引入已知的参考接收机的 TOT DLY (即式 (7) 和式 (8) 中的 d_{TOT}), 可计算得到被校准接收机的接收机总延迟, 即完成时延校准。根据以上方法计算各站 240~290 天钟差结果, 得到的各台接收机时延值见表 6。

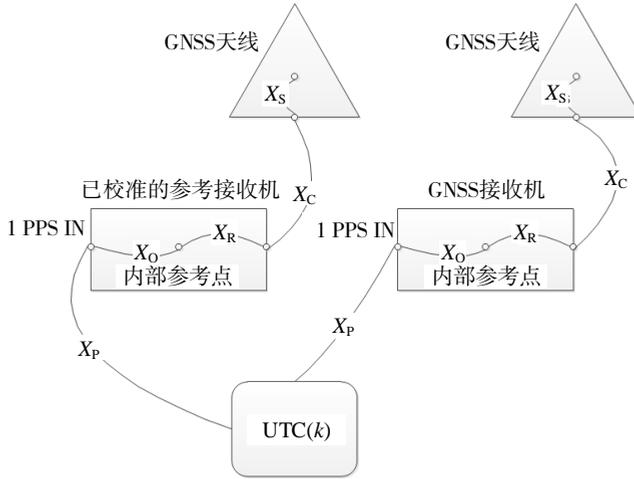


图 11 接收机时延相对校准示意图

$$\text{UTC}(k) - \text{IGRT} = T_{\text{PPP}} - d_{\text{TOT}} \quad (7)$$

$$T_{\text{PPP1}} - T_{\text{PPP2}} = d_{\text{TOT1}} - d_{\text{TOT2}} \quad (8)$$

表 6 计算得到的各接收机总时延 单位: ns

站名	总时延 (TOT DLY)	备注	站名	总时延 (TOT DLY)	备注
BRCH	367.73	BRCH-PTBB	XIA5	38.98	XIA5-NTP1
XIA3	41.36	XIA3-NTP1	XIA6	-55.15	XIA6-NTP1
XIA4	58.62	XIA4-NPT1			

3 结语

本文以参与 BIPM 国际时间比对的接收机 PTBB 和 NTP1 作为参考, 分别对位于 PTB 守时实验室的 BRCH 接收机, 和位于 NTSC 守时实验室的 XIA3, XIA4, XIA5, XIA6 接收机搭建试验平台, 对各台 iGMAS 接收机进行钟差分析和时延校准。综合分析表明: iGMAS 跟踪站 BRCH 与参与 BIPM 国际时间比对的 PTBB 站钟差结果基本一致, 与对照参考接收机 PT11 差异 STD 小于 0.35 ns, 可为 BRCH 站开展时间传递、授时性能评估等工作提供参考; 位于 NTSC 守时实验室的 iGMAS 测试跟踪站 XIA3、XIA5, 与参与国际时间比对的 NTP1 接收机链路钟差 STD 小于 0.5 ns, 可为后期的授时服务提供参考, 但其性能需要进一步提升。以 PTBB 和 NTP1 接收机校准值作为参考, 对各台 iGMAS 接收机时延开展了相对校准。

论文相关结果可为后续基于 iGMAS 跟踪站的授时监测、国际时间传递及其他时间频率服务提供参考。

致谢: 感谢中国科学院国家授时中心 iGMAS 分析中心提供的 PPP 解算平台; 感谢中国科学院国家授时中心时间基准实验室提供 NTP1 数据; 感谢 IGS 提供的高精度卫星轨道和钟差产品; 感谢 PTB 提供高精度观测数据; 感谢 BIPM 提供时间传递的相关数据。感谢国家科技基础条件平台-国家空间科学数据中心 (<http://www.nssdc.ac.cn>), 中科院“西部之光”人才培养计划“一带一路”团队项目“北斗授时监测及其国际时间比对团队”提供资助。

参考文献:

- [1] 焦文海, 丁群, 李建文, 等. GNSS 开放服务的监测评估[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2011, 41(5): 521-527.
- [2] 杨海彦. iGMAS 观测质量改进及电离层高精度监测研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2016.
- [3] DEFRAIGNE P, PETIT G, UHRICH P, et al. Requirements on GNSS receivers from the perspective of timing applications[C] // Euf- European Frequency & Time Forum, Noordwijk: IEEE, 2013.
- [4] DEFRAIGNE P, AERTS W, CERRETTO G, et al. Calibration of Galileo signals for time metrology[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2014, 61(12): 1967-1975.
- [5] LIU Y H, LI X H, ZHANG H J, et al. Calculation and accuracy evaluation of TGD from IFB for BDS[J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 461-471.
- [6] DEFRAIGNE P, BRUYNINXC C, GUYENNON N. PPP and phase-only GPS time and frequency transfer[C] // 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum IEEE, Geneva: IEEE, 2007.
- [7] PETIT G, KANJ A, LOYER S, et al. 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution[J]. Metrologia, 2015, 52(2): 301-309.
- [8] 李永萍, 屈俐俐. NTSC-PTB 链路的 GPS 全视法时间比对数据分析[J]. 时间频率学报, 2012, 35(3): 143-147.
- [9] JIANBG Z, LEWANDOWSKI W. On the measurement quality of UTC time transfer evolution and reevaluation of measurement uncertainty in [UTC-UTC(k)][K]. Paris: BIPM, 2011.
- [10] 陈婧亚, 许龙霞, 李孝辉. 一种共视接收机相对时延校准方法[J]. 时间频率学报, 2017, 40(1): 19-26.
- [11] DEFRAIGNE P, PETIT G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS time transfer[J]. Metrologia, 2015, 52(6): G1.