

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.010

基于北斗三号 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递

韩晓红^{1,2}, 孙保琪^{1,2}, 张喆^{1,2}, 周红源^{1,3}, 杨海彦^{1,2}, 赵当丽^{1,2}, 杨旭海^{1,2}

- 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710664)

摘要:面向精密可靠的远程时间传递需求,提出一种基于北斗三号 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递方法。该方法利用北斗三号精密单点定位(precise point positioning, PPP)服务提供的精密轨道改正数,根据实时载波相位单差技术估算异地接收机的相对钟差,实现高精度时间传递。基于中国及周边地区6个跟踪站连续多天的北斗三号系统观测数据开展试验,验证了该时间传递方法的性能。试验结果表明:零基线时间传递结果的标准差优于0.03 ns。与事后PPP时间传递相比,长基线时间传递结果差值的标准差优于0.3 ns,时间传递天边界连续性更好。基于北斗三号 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递方法,不依赖精密卫星钟差,能实现亚纳秒量级的时间传递精度,具有易于实现、连续性好的优势。试验结果可为北斗精密时间服务提供一定的参考。

关键词:精密共视;北斗三号;PPP-B2b;卫星轨道;载波相位

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2023)04-0103-09

Real-time precise common-view time transfer based on BDS-3 PPP-B2b orbit

HAN Xiaohong^{1,2}, SUN Baoqi^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, ZHOU Hongyuan^{1,3}, YANG Haiyan^{1,2}, ZHAO Dangli^{1,2}, YANG Xuhai^{1,2}

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710604, China)

Abstract: In order to meet the needs of precise and reliable remote time transfer, a real-time precise common-view time transfer method based on BDS-3 (BeiDou-3 navigation satellite system) PPP-B2b orbit is proposed. The method utilizes the precise orbit corrections provided by BDS-3 precise point positioning(PPP) service to estimate the relative clock difference of the remote receiver according to the real-time carrier phase single difference technology, and achieve the high-precision time transfer. Based on the multi-day BDS-3 observation data of six tracking stations in China and surrounding areas, the performance of the time transfer method is verified. The test results show that the standard deviation of the zero-baseline time transfer result is better than 0.03 ns. Compared with the PPP time transfer, the standard deviation of difference between the long baseline time transfer results is better than 0.3 ns, and the day-boundary continuity of the time

收稿日期:2022-09-26;修订日期:2022-11-01

基金项目:陕西省重点研发计划(2022KW-29);中国科学院“西部之光”项目(XAB2021YN25);国家自然科学基金面上项目(12073034)

作者简介:韩晓红(1992-),女,硕士研究生,主要从事 GNSS 精密数据处理方面的研究。

通信作者:孙保琪(1979-),男,研究员,主要从事 GNSS 精密定轨定位与授时方面的研究。

transfer is better. The real-time precise common-view time transfer method based on BDS-3 PPP-B2b orbit does not rely on precise satellite clock, and can reach sub-nanosecond accuracy. It has the advantages of easy implementation and well continuity. The test results can provide some reference for BDS precise time service.

Key words: Precise common-view; BDS-3; PPP-B2b; Satellite orbit; Carrier phase

0 引言

精密单点定位(precise point positioning, PPP)服务是北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)的特色服务之一,以 PPP-B2b 信号为通道,通过 3 颗地球静止轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星向我国及周边地区播发 BDS-3 和其他全球卫星导航系统(目前只有 GPS)的精密轨道和卫星钟差等改正参数,可满足用户分米到厘米级的高精度实时定位需求^[1-2]。不同于国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)组织提供的实时服务,在没有互联网覆盖的区域,用户仍可以获取 BDS-3 实时 PPP 服务^[3]。

BDS-3 正式提供服务后,多位学者对 BDS-3 PPP 服务进行了相关研究。LU Xiangchen 等^[4]使用软件定义接收机对 PPP-B2b 信号进行采集和信息提取,分析了 PPP 服务的完整性和稳定性,结果表明北斗 PPP-B2b 信号可以稳定为中国区域提供 PPP 服务。宋伟伟等^[5]基于国际 GNSS 监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS)在中国的跟踪站,评估了 PPP-B2b 实时产品的精度及用于 PPP 的性能,结果表明 BDS-3 的 PPP-B2b 产品可满足中国区域对实时 PPP 的需求。TAO Jun 等^[6]比较法国国家空间研究中心(Centre National D'Etudes Spatiales/National Centre for Space Studies, CNES)实时 PPP 服务和 BDS-3 PPP 服务的性能,结果表明,在中国及周边地区,BDS-3 PPP 服务的可用性和完整性均优于 CNES。文献[7-9]对 PPP-B2b 改正数信息的准确性、可用性和实时 PPP 性能进行了综合评估。文献[10-11]以 IGS 不同分析中心提供的精密产品为参考,评估了 PPP-B2b 精密产品的精度,结果表明 PPP-B2b 实时轨道径向误差和卫星钟误差均在厘米级。综上发现,目前对 BDS-3 PPP 服务的研究主要集中在精密改正数自身的精度和用于 PPP 定位的性能,在时间传递方面的应用研究鲜有报道。

时间传递对于标准时间的保持、播发以及分布式系统的协同工作具有重要意义。时间传递方法

中,共视法(common view, CV)是最简单直接的一种方法,具有连续性好和易于实现等优点,是国际时间比对的重要时间传递手段^[12]。传统的 CV 法使用码伪距观测量,时间传递精度较低。为提高时间传递精度,比码伪距观测量精度高两个量级的载波相位观测量逐步被应用于共视时间传递。基于 IGS 最终轨道产品的 GPS 载波相位共视时间传递,5 000 km 的基线长度内,时间传递精度与卫星双向时间传递结果相当^[13-14]。杨旭海^[15]提出基于北斗 GEO 导航卫星的精密共视(precise common view, PCV)时间传递方法,在坐标精确已知的前提下,待测两站同时观测同一颗 GEO 卫星,联合码伪距和载波相位观测量,使用精密卫星轨道开展时间频率传递。基于 iGMAS 数据平台,丁硕^[16]开展了基于北斗 GEO 卫星的 PCV 时间传递试验,结果表明,2 000~3 000 km 的长基线,PCV 时间传递精度与卫星双向时间传递基本相当。2021 年全国时频学术会议上,孙保琪将 PCV 时间传递方法从 GEO 卫星扩展到 BDS 全星座卫星,基于 BDS 卫星的 PCV 时间传递精度可达亚纳秒量级^[17]。PCV 方法较传统 CV 法,使用了高精度载波相位观测量和精密卫星轨道;较 PPP 技术减少了对精密卫星钟差产品的依赖^[18],可更简单直接地实现同样精度量级的时间传递。

BDS-3 PPP-B2b 信号服务有保障,而且不依赖互联网传输,可为实时 PCV 时间传递提供新的更加可靠的精密轨道产品。本文首先介绍了基于 BDS-3 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递原理;然后基于中国及周边地区 6 个 iGMAS/IGS 跟踪站的多天实测数据开展试验,验证该方法的时间传递效果。

1 基于 PPP-B2b 的实时 PCV 时间传递原理

1.1 基本思想

基于北斗三号 PPP-B2b 轨道的实时 PCV 时间传递原理如图 1 所示。时间基准站和用户站分别外接本地时钟,两站同时观测一颗或多颗北斗三号卫星,用户站同时接收 PPP-B2b 信号,解析获取北斗

三号卫星的精密轨道改正数。两站观测值作站间一次差分,利用站间单差观测值和 PPP-B2b 实时精密卫星位置,求解得到时间基准站和用户站之间的相对钟差。结合校准数据,在解算得到的相对钟差中扣除接收机、天线、电缆等设备时延,即可实现时间基准站和用户站本地时钟之间的时间传递。

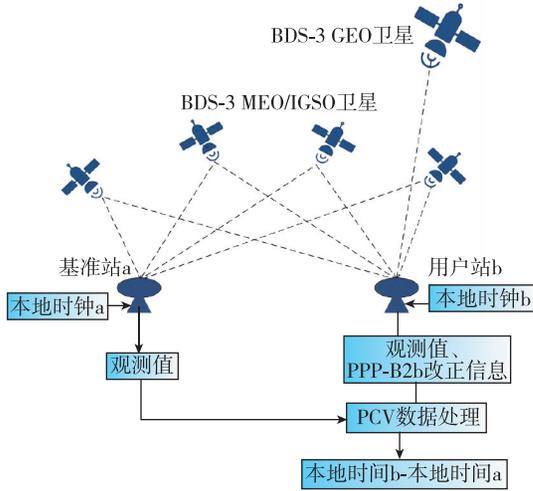


图1 基于 PPP-B2b 轨道的 PCV 时间传递原理

Fig. 1 Principle of PCV time transfer based on PPP-B2b

1.2 观测方程

采用无电离层组合消除电离层延迟,建立码伪距和载波相位观测方程如下

$$P_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + e_r^s \quad (1)$$

$$L_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda N_r^s + \epsilon_r^s \quad (2)$$

其中, P_r^s 和 L_r^s 分别表示无电离层组合码伪距观测值和载波相位观测值, r 和 s 分别表示接收机和卫星; ρ_r^s 表示卫星到接收机的几何距离; dt_r 表示接收机钟差; dt^s 表示卫星钟差; T_r^s 表示对流层延迟; c 为光速; λ 表示无电离层组合波长; N_r^s 表示载波相位模糊度(含部分设备时延); e_r^s, ϵ_r^s 分别表示无电离层组合码伪距和载波相位的观测噪声。

当基准站 a 和用户站 b 同时观测同一颗北斗卫星 s, 两站观测值作差得到的单差码伪距和载波相位观测方程表示如下

$$\Delta P_{a,b}^s = \Delta \rho_{a,b}^s + c \Delta dt_{a,b} + \Delta T_{a,b}^s + \Delta e_{a,b}^s \quad (3)$$

$$\Delta L_{a,b}^s = \Delta \rho_{a,b}^s + c \Delta dt_{a,b} + \Delta T_{a,b}^s + \lambda \Delta N_{a,b}^s + \Delta \epsilon_{a,b}^s \quad (4)$$

由式(3)、式(4)知, a, b 站间单差消除了卫星钟差, 同时削弱了轨道误差。几何距离项通过精密卫星轨道和接收机位置进行计算修正, 同时考虑接收机及卫星天线相位中心改正, 固体潮及海潮引起的测

站位移改正等。接收机相对钟差、对流层延迟和载波相位模糊度作为未知参数进行解算。

1.3 参数估计

将式(3)、(4)进一步线性化, 其误差方程和待估参数表示如下

$$\mathbf{V} = \mathbf{H}\mathbf{X} - \mathbf{L} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta dt_r, \Delta T^s, \Delta N_r^s] \quad (6)$$

式中, \mathbf{V} 表示观测残差矢量; \mathbf{H} 表示系数矩阵; \mathbf{L} 表示观测量减去计算值得到的常数项; \mathbf{X} 表示待估参数矢量; $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 表示用户站相对基准站的坐标增量; ΔT^s 表示对流层天顶延迟; Δdt_r 表示所求用户站与基准站间的接收机相对钟差; ΔN_r^s 表示载波相位整周模糊度。

考虑到实时性, 采用扩展卡尔曼滤波算法进行参数估计, 状态方程及观测方程表示为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (7)$$

式中, \mathbf{X}_k 表示 k 时刻的状态矢量; $\mathbf{A}_{k,k-1}$ 表示状态转移矩阵; \mathbf{w}_{k-1} 表示过程噪声矢量, 其方差表示为 \mathbf{Q}_k ; \mathbf{Y}_k 表示 k 时刻的观测矢量; \mathbf{H}_k 表示观测矢量的系数矩阵; \mathbf{v}_k 表示观测噪声矢量, 其方差表示为 \mathbf{R}_k 。

状态矢量的最优估值 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 及其方差-协方差 \mathbf{P}_k 表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (9)$$

式(8)、(9)中, \mathbf{K}_k 表示增益矩阵; $\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$ 表示预测值; $\mathbf{P}_{k,k-1}$ 表示预测值的方差-协方差。表示如下

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k \quad (12)$$

高精度时间传递一般为静态用户, 用户站在进行 PCV 时间传递中, 接收机的坐标位置可提前精确测定。此时, 状态矢量 \mathbf{X}_k 中的未知参数只包含接收机相对钟差、对流层天顶延迟和载波相位模糊度。

1.4 PPP-B2b 精密轨道恢复

将 PPP-B2b 改正数结合广播星历, 可恢复出 PCV 时间传递所需的精密卫星轨道。对于 BDS-3, PPP-B2b 改正数用于改正 CNAV1 电文。PPP-B2b 改正数中主要包含轨道改正数、钟差改正数以及码间偏差改正数等, 其中轨道改正数更新间隔为 48s, 钟差改正数更新间隔为 6 s。用户可以通过以下算法^[19]得到精密的卫星位置。

轨道改正数包括轨道改正矢量 $\delta\mathbf{O}$ 在径向、切向和法向的分量,用于计算卫星位置改正矢量 $\delta\mathbf{X}$,结合由广播星历计算出来的卫星矢量 $\mathbf{X}_{\text{broadcast}}$ 即可算出改正后的卫星位置矢量 $\mathbf{X}_{\text{orbit}}$ 。计算公式如下

$$\mathbf{X}_{\text{orbit}} = \mathbf{X}_{\text{broadcast}} - \delta\mathbf{X} \quad (13)$$

式(5)中,卫星位置改正矢量 $\delta\mathbf{X}$ 的计算方法如下

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\text{radial}} &= \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \\ \mathbf{e}_{\text{cross}} &= \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|} \\ \mathbf{e}_{\text{along}} &= \mathbf{e}_{\text{radial}} \times \mathbf{e}_{\text{cross}} \\ \delta\mathbf{X} &= [\mathbf{e}_{\text{radial}} \quad \mathbf{e}_{\text{along}} \quad \mathbf{e}_{\text{cross}}] \cdot \delta\mathbf{O} \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $\mathbf{r} = \mathbf{X}_{\text{broadcast}}$ 表示广播星历卫星位置矢量, $\dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{X}}_{\text{broadcast}}$ 表示广播星历卫星速度矢量, $\mathbf{e}_{\text{radial}}$ 、 $\mathbf{e}_{\text{along}}$ 、 $\mathbf{e}_{\text{cross}}$ 分别表示径向、切向、法向单位矢量。

2 试验数据与策略

2.1 试验设计

为了验证基于北斗三号 PPP-B2b 精密轨道的 PCV 实时时间传递方法的效果,选取中国及周边地

区的 6 个 iGMAS/IGS 跟踪站开展试验。以位于中国科学院国家授时中心(National Time Service Center, NTSC)临潼本部的 XIA6 站为基准站,其他站作为用户站,设计了零基线和长基线两种时间传递链路。跟踪站位置分布如图 2 所示。XIA6 外接 UTC(NTSC) 10MHz 频率和 1PPS 信号,与 XIA6 站进行时间传递,用户可以获取本地时间与 UTC(NTSC)的偏差。各跟踪站的具体信息如表 1 所示。

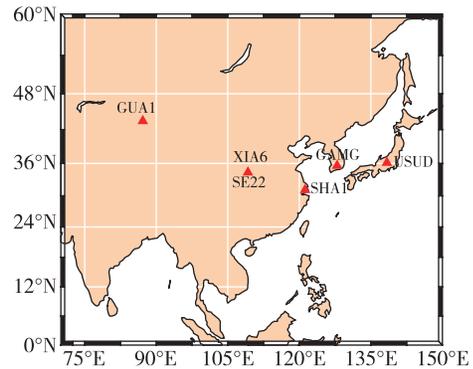


图 2 试验跟踪站分布图

Fig. 2 Distribution map of tracking stations

表 1 跟踪站信息

Tab. 1 Information of tracking stations

| 跟踪站名 | 跟踪站类别 | 接收机型号 | 天线类型 | 与 XIA6 距离/km | 外接时钟 |
|------|-------|-----------------|------------------|--------------|--------------|
| XIA6 | 基准站 | Sept Polarx5 TR | SEPCHOKE_B3E6 | / | 外接 UTC(NTSC) |
| SE22 | 用户站 | Sept Polarx5 TR | SEPCHOKE_B3E6 | 0 | 外接 UTC(NTSC) |
| SHA1 | 用户站 | Unicore UB4B0 | NOV750. R4 NOV5 | 1 178 | 铷钟 |
| GAMG | 用户站 | Sept Polarx5 TR | LEIAR25. R4 LEIT | 1 708 | 晶振 |
| GUA1 | 用户站 | MGR_iGMAS | Geodetic-GNSS | 2 152 | 铷钟 |
| USUD | 用户站 | Sept Polarx5 | AOAD/M_T JPLA | 2 646 | 氢钟 |

2.2 试验策略

基于改编的 RTKLIB 软件^[20],以实时模式开展 PCV 时间传递试验。PPP 技术是目前 GNSS 时间传递中精度较高且广泛使用的方法之一。为了分析 PCV 实时时间传递精度,基于事后精密产品以 PPP 模式解算上述 6 个跟踪站的钟差,形成对应基线的 PPP 时间传递结果。具体解算策略如表 2 所示。

两种方法均利用 BDS-3 MEO 和 IGSO 卫星的 B1I/B3I 双频观测值。PCV 方法只用 PPP-B2b 实时精密卫星轨道产品,不需要实时精密卫星钟差产品;PPP方法使用德国地学中心(Deutsches Geo For-

表 2 PCV/PPP 时间传递解算策略

Tab. 2 Strategies for PCV/PPP time transfer

| 选项 | 设置 |
|-----------|---|
| 跟踪站坐标 | 静态解算 |
| 观测值 | B1I/B3I 码伪距和载波相位 |
| 卫星轨道和钟差 | PCV: PPP-B2b 实时精密轨道 PPP: GFZ 事后精密轨道和卫星钟差 |
| 电离层延迟改正 | 双频消电离层组合 |
| 对流层延迟改正 | ZTD+梯度估计 |
| 固体潮改正 | IERS 2010 |
| 海潮改正 | FES2004 |
| 天线相位中心 | CSNO/TARC(2019) |
| 参数估计 | 扩展卡尔曼滤波 |
| 截止高度角 | 10° |
| 观测值采样间隔时间 | 30 s |

schungs Zentrum, GFZ)提供的多系统精密轨道和卫星钟差产品,其余各项误差改正和参数估计方法均相同。

3 结果与分析

3.1 精度评估方法

基于共钟零基线方式分析 PCV 方法可能达到的理想精度,利用 PPP 时间传递结果分析长基线 PCV 时间传递性能。目前,国际计量局已采用 GPS PPP 时间传递技术进行 UTC 国际时间比对,事后 PPP 时间传递精度优于 $0.3 \text{ ns}^{[21-22]}$ 。研究表明,基于 GFZ 多系统精密产品的 BDS PPP 时间传递精度与 GPS PPP 相当^[23-24]。故在长基线结果分析中,将 BDS PPP 结果和 PCV 结果进行对比作差,统计该差值的标准差(STD)作为评估 PCV 时间传递精度的依据,同时统计该差值的平均值(MEAN),用来反映两种解算方法之间的系统偏差。

需要指出的是,实际开展精密时间传递时需要对接收机、天线、电缆等设备时延进行校准。本文聚焦时钟之间相对钟差的解算方法研究,且同一条长基线 PCV 和 PPP 两种技术的设备时延一致,不影响精度评估,所以时间传递试验结果中没有扣除设备时延校准值。同时,本次试验中 PPP 时间传递链路未进行校准,所以只对时间传递的稳定性进行评估,不涉及时间传递的准确性。

3.2 零基线时间传递

选取 NTSC 临潼本部 XIA6 与 SE22 跟踪站构成零基线,两跟踪站使用同一型号接收机且共钟共天线,均外接 UTC(NTSC) 10 MHz 频率和 1PPS 信号。理论上,共钟零基线时间传递结果为白噪声,数学期望为 0。实际中,由于接收机硬件延迟不完全一致,共钟零基线时间传递结果中还包含两台接收机之间的硬件延迟差异。一般情况下,同一型号接收机硬件延迟一致性比较好,因此可以基于共钟零基线方法评价 PCV 时间传递的理想精度。基于 2021 年第 343~349 天共 7 天的数据开展零基线 PCV 时间传递试验。

图 3 给出了零基线 PCV 时间传递结果。由于 XIA6 设置了接收机内部延迟自动校准,而 SE22 未设置,导致两接收机间 B1I/B3I 双频无电离层组合零基线 PCV 时间传递结果,存在约 23 ns 的常数偏差。零基线 PCV 时间传递结果峰峰值在 0.15 ns 以内,STD 为 0.021 ns 。

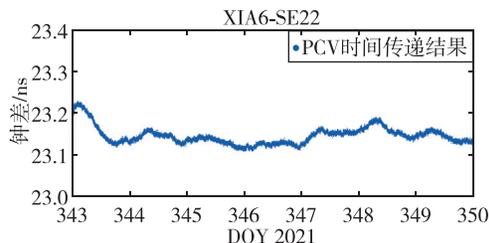


图 3 零基线时间传递结果

Fig. 3 Results of the zero-baseline time transfer

3.3 长基线时间传递

选取与时间基准站 XIA6 相距 1 000 km 以上的 4 个跟踪站形成 4 条长基线,分别为 XIA6-USUD、XIA6-GUA1、XIA6-SHA1、XIA6-GAMG。基于 2022 年第 18~47 天共 30 天的数据开展长基线 PCV 实时时间传递试验。

图 4 分别给出了 4 条长基线 PCV 时间传递与 PPP 时间传递结果。XIA6-SHA1 基线两种时间传递结果在年积日第 25 天存在连续的 3 次较大跳变。进一步分析发现,SHA1 单站 PPP 钟差结果(图 5)中的相同时刻存在同样大小的跳变,跳变时刻钟差量级为 -0.5 ms 或 $+0.5 \text{ ms}$,跳变的数值约为 1 ms 。考虑到 GNSS 接收机通常会以实施毫秒跳的方式将钟差控制在一定范围以内,因此推断图 4 中 XIA6-SHA1 基线时间传递结果中的跳变是 SHA1 接收机钟跳造成的。此外,图 5 中存在振幅为 0.1 ms 左右的天周期性起伏,可能与 SHA1 站时钟特性及其控制策略有关。XIA6-GAMG 基线时间传递结果存在振幅为 20 ns 左右的以天为周期的起伏。考虑到 GAMG 接收机的时钟为内部晶振,结合该站 PPP 钟差时间序列(图 6),推断是因为 GAMG 接收机时钟驾驭到 GPS 时造成了时间传递结果中的周期性起伏。

图 7 分别给出了 4 条长基线 PCV 时间传递与 PPP 时间传递结果的差值时间序列。4 条基线均存在差值时间序列重收敛或部分时段跳变的现象。以 XIA6-USUD 基线为例,对比两种时间传递结果发现,重收敛现象主要由观测数据缺失导致的。跳变现象多数存在于天边界,如图中的第 22、24、28、37 天等。对第 22、24 天边界时段时间传递结果进行比较(图 8)发现,PCV 时间传递结果连续,不存在跳变,跳变现象出现于 PPP 时间传递结果中。目前,关于 PPP 方法天边界不连续问题的产生原因及改进方法已有不少研究^[25-28]。初步推断图 8 中

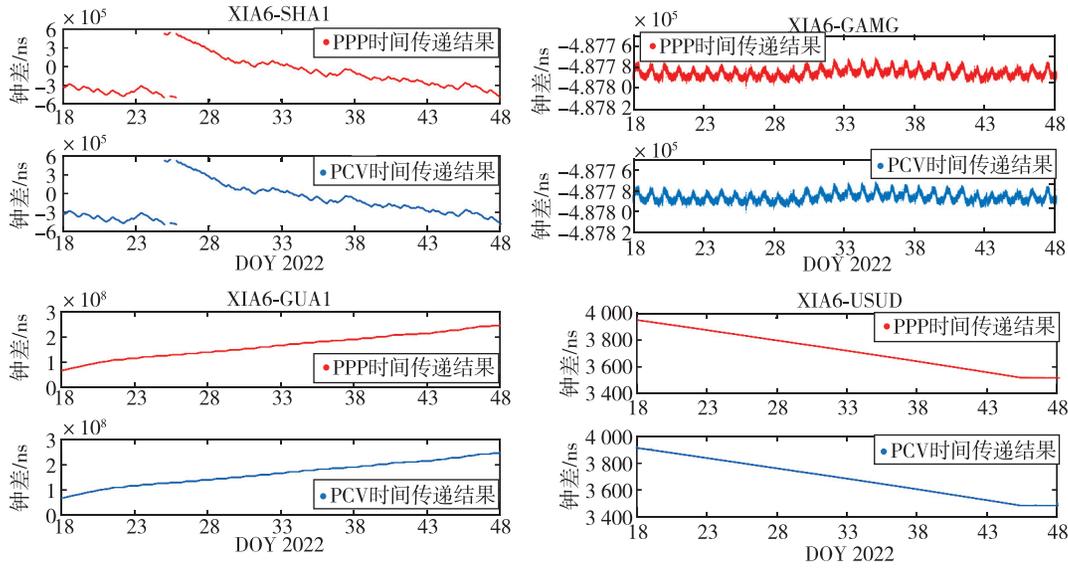


图 4 长基线时间传递结果

Fig. 4 Results of the long-baseline time transfer

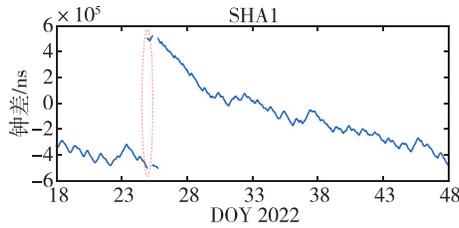


图 5 基于 PPP 解算的 SHA1 接收机钟差
Fig. 5 Clock of receiver SHA1
based on PPP estimation

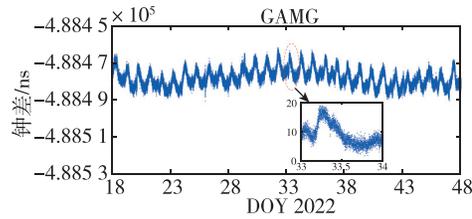


图 6 基于 PPP 解算的 GAMG 接收机钟差
Fig. 6 Clock of receiver GAMG
based on PPP estimation

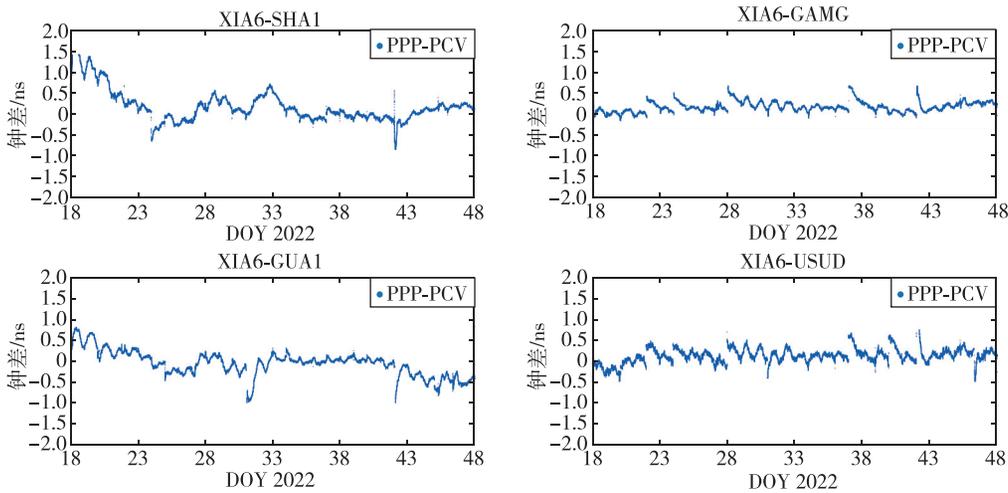


图 7 长基线 PCV 时间传递与 PPP 时间差值结果

Fig. 7 Differences between PCV time transfer and PPP time transfer for long-baseline

PPP 结果天边界不连续主要是由使用的 GFZ 精密卫星钟差产品相邻天之间时间基准不连续导致的。

整体来看, 4 条长基线 PCV 时间传递与 PPP 时间传递结果较为符合。不考虑收敛过程的情况

下, XIA6-USUD、XIA6-GAMG 2 条基线的时间传递结果差值整体保持在 ± 0.5 ns 以内, XIA6-GUA1、XIA6-SHA1 2 条基线大部分保持在 ± 1 ns 以内。

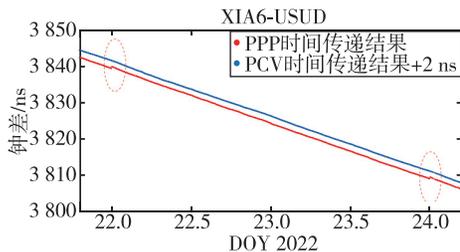


图 8 XIA6-USUD 时间传递结果(部分时段)

Fig. 8 Results of time transfer for baseline XIA6-USUD (Partial period)

为分析长基线 PCV 时间传递精度, 将收敛时段中较大的数值作为异常值剔除, 对图 7 中时间传递结果差值的 STD 和 MEAN 进行统计, 如表 3 所示。从中可以看出, 4 条长基线时间传递结果差值的 MEAN 值均低于 0.13 ns, STD 均优于 0.3 ns。

表 3 PCV 与 PPP 时间传递结果差值统计

| Tab. 3 Statistics of the difference between PCV and PPP | | | ns |
|---|-------|--------|----|
| PPP(GBM) - PCV(B2b) 比对 | STD | MEAN | |
| XIA6-SHA1 | 0.284 | 0.103 | |
| XIA6-GAMG | 0.121 | 0.127 | |
| XIA6-GUA1 | 0.297 | -0.092 | |
| XIA6-USUD | 0.167 | 0.091 | |

4 结论

基于北斗三号 PPP 服务, 提出了一种基于 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递方法。利用中国及周边地区 6 个 iGMAS/IGS 跟踪站的实测数据, 以事后 PPP 时间传递结果为参考, 分析了该方法的时间传递精度。试验结果表明:

1) 零基线 PCV 时间传递结果的 STD(包含硬件延迟变化) 优于 0.03 ns。长基线 PCV 时间传递与 PPP 时间传递结果较为符合, 差值时间序列的 STD 优于 0.3 ns。目前, 国际计量局 PPP 时间传递(事后模式) 的稳定度优于 0.3 ns, 因此, 在亚纳秒量级上可以认为 PCV 方法与 PPP 方法时间传递能力相当。

2) 相比 PPP 方法, PCV 方法不依赖精密卫星钟差, 实现过程简单直接, 且 PCV 时间传递天边界连续性更好。PPP 时间传递方法, 先基于载波相位观测量和精密产品求解单站钟差结果, 再两站钟差作差得到时间传递结果。而 PCV 方法, 属于载波相位单差时间传递技术, 站间单差消除了卫星钟差引起的误差, 不需要引入卫星钟差产品, 解算结果即为时间传递结果, 避免了类似 PPP 方法中的天边界不连续问题。

基于 BDS-3 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递方法, 可实现亚纳秒量级的时间传递精度。论文结果可为进一步开展基于北斗 PPP-B2b 信号的实时时间传递研究提供一定的参考。

参考文献

- [1] 黄伦文, 孟宪伟. 基于北斗 3 号 PPP-B2b 信号的精密单点定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(5):516-519.
HUANG Lunwen, MENG Xianwei. Accuracy analysis of precise point positioning using BDS-3 PPP-B2b signals [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(5):516-519(in Chinese).
- [2] 肖浩威, 王江林, 郭海荣, 等. PPP-B2b 服务的实时精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报, 2022(4): 117-121.
XIAO Haowei, WANG Jianglin, GUO Hairong, et al. Real-time precise point positioning precision analysis based on PPP-B2b service[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(4):117-121(in Chinese).
- [3] YANG Y X, LIU L, LI J L, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2135-2143.
- [4] LU X C, CHEN L, SHEN N, et al. Decoding PPP corrections from BDS B2b signals using a software-defined receiver: an initial performance evaluation[J]. IEEE Sensors Journal. 2020, 21, (6): 7871-7883.
- [5] 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3):408-415.
SONG Weiwei, ZHAO Xinke, LOU Yidong, et al. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b service[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(3):408-415(in Chinese).
- [6] TAO J, LIU J N, HU Z G, et al. Initial assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4).

- [7] XU Y Y, Yang Y X, LI J L. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4).
- [8] REN Z L, GONG H, PENG J, et al. Performance assessment of real-time precise point positioning using BDS PPP-B2b service signal [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(8).
- [9] NIE Z X, XU X F, WANG Z J, et al. Initial assessment of BDS PPP-B2b service; precision of orbit and clock corrections, and PPP performance [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11).
- [10] LIU Y, YANG C, ZHANG M N. Comprehensive analyses of PPP-B2b performance in China and surrounding areas [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3).
- [11] ZHANG W X, LOU Y D, SONG W W, et al. Initial assessment of BDS-3 precise point positioning service on GEO B2b signal [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1):69-700.
- [12] 李国俊,王存军,叶虎春. 北斗三号共视时间传递性能分析[J]. *天文学报*, 2022, 63(3):76-86.
LI Guojun, WANG Cunjun, YE Huchun. Performance analysis of BeiDou-3 common-view time transferring [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2022, 63 (3): 76-86 (in Chinese).
- [13] LEE S W, SCHUTZ B E, LEE C B, et al. A study on the common-view and all-in-view GPS time transfer using carrier-phase measurements [J]. *Metrologia*, 2008, 45 (2):156-167.
- [14] LEE S W, KIM J. Performance evaluation of real-time carrier-phase GPS time transfer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6).
- [15] 杨旭海. 一种基于北斗 GEO 导航卫星的精密共视时间频率传递方法 [C]//中国天文学会 2018 年学术年会摘要集. 2018:77-78.
YANG Xuhai, WEI Pei, et al. Precise common-view time and frequency transfer based on BDS GEO satellite [C]//Abstracts of the 2018 Academic Annual Conference of the Chinese Astronomical Society, 2018:77-78 (in Chinese).
- [16] 丁硕. 基于北斗 GEO 卫星的精密共视时间频率传递方法研究 [D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
DING Shuo. Study of the method of precise common-view time and frequency transfer via BDS GEO satellites [D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2020(in Chinese).
- [17] 孙保琪,周红源,刘嘉伟,等. 基于 iGMAS 的多模式国家标准时间精密服务 [C]//全国时间频率学术会
议. 敦煌, 2021.
SUN Baoqi, ZHOU Hongyuan, LIU Jiawei, et al. A multi-modal national standard time precise service based on iGMAS [C]// National Academic Conference of Time and Frequency. Dunhuang, 2021(in Chinese).
- [18] 孙保琪,韩蕊,刘嘉伟,等. 基于北斗三号的多区域实时动态授时服务系统 [J]. *导航定位与授时*, 2021, 8 (4):45-52.
SUN Baoqi, HAN Rui, LIU Jiawei, et al. A multi-region real-time kinematic timing service system based on BeiDou-3 [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(4):45-52(in Chinese).
- [19] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件精密单点定位服务信号 PPP-B2b(1.0 版) [DB/OL]. [2022-5-26]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202008/P020200803362060-731204.pdf>.
BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document precise point positioning service signal PPP-B2b (Version 1.0) [DB/OL]. [2022-5-26]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202008/P020200803362060731204.pdf>(in Chinese).
- [20] TAKASU T. RTKLIB ver. 2.4.2 Manua [OL]. 2013, 4. <https://www.rtklib.com/prog/manual/2.4.2pdf>.
- [21] 杨旭海,李孝辉,华宇,等. 卫星授时与时间传递技术进展 [J]. *导航定位与授时*, 2021, 8(4):1-10.
YANG Xuhai, LI Xiaohui, HUA Yu, et al. Technical progress of satellite time service and time transfer [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(4):1-10(in Chinese).
- [22] 翟宏亮,王胜利. BDS-3 精密单点定位时间传递综合性能分析 [J]. *全球定位系统*, 2022, 47(4):31-38.
ZHAI Hongliang, WANG Shengli. Comprehensive performance analysis of BDS-3 precise point positioning time transfer [J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(4):31-38(in Chinese).
- [23] 张如飞,刘晖,舒宝,等. BDS PPP 高精度时间传递方法与精度比较 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37 (10):1070-1073.
ZHANG Rufei, LIU Hui, SHU Bao, et al. Research on time transfer: based on BDS precise point positioning and accuracy comparison [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37 (10): 1070-1073 (in Chinese).
- [24] 张继海,董绍武,袁海波,等. 北斗三号非差组合载波相位时间比对性能分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42 (11):45-53.
ZHANG Jihai, DONG Shaowu, YUAN Haibo, et al.

- The performance analysis of BeiDou-3 undifferenced combined carrier phase time comparison[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 45-53 (in Chinese).
- [25] JIAN Y, IVAN S, JIANG Z H, et al. A detailed comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques[J]. Metrologia, 2015, 52(5): 666-676.
- [26] JIAN Y, JUDAH L. An improvement of RINEX-shift algorithm for continuous GPS carrier-phase time transfer [C]// Proc. 27th ION GNSS + 2014 Conf. 1253-1260.
- [27] GÉRARD P, PASCALE D. The performance of GPS time and frequency transfer: comment on ‘A detailed comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques’[J]. Metrologia, 2016, 53(3): 1003.
- [28] 张向波, 郭际, 胡永辉, 等. 日界不连续误差对 GNSS 载波相位频率传递的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(4): 371-377.
- ZHANG Xiangbo, GUO Ji, HU Yonghui, et al. Influence of day-boundary discontinuities on GNSS carrier phase frequency transfer[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(4): 371-377 (in Chinese).

(编辑: 黄利华)