

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311798

基于 PPP 和共视技术的改进 PPP 时间频率传递方法*

路润民^{1,2,3}, 张杰^{1,2,3,4}, 钟世明^{1,2}, 韩金阳^{1,2}, 梁子涵^{1,2}

- (1. 湖北珞珈实验室 武汉 430072; 2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室 武汉 430077; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量国家野外科学观测研究站 武汉 430077)

摘要: PPP 时间频率传递技术是高精度 GNSS 时间频率传递技术之一,且具有精度高、范围广、低成本等特点,而共视时间频率传递的站间差分能够消除卫星钟差和削弱电离层、对流层等路径误差,本研究结合两种方法的优点实现了一种改进 PPP 时间传递方法。实验选取了 5 个连接 UTC(k) 和 1 个外接高精度氢原子钟的 IGS 测站,建立了零基线、短基线和长基线链路评估该方法的时频传递性能,实验结果表明,以 IGS 最终钟差产品为时间参考,改进 PPP 时间传递精度相比 PPP 提高了 2.55%~17.78%。零基线链路频率稳定度达到 $2.0 \times 10^{-17}/600\ 000\ \text{s}$,且不切换共视星时,其短期频率稳定度优于 PPP,长期频率稳定度与 PPP 相当;非零基线链路中各链路的改进 PPP 在时间间隔 10 000 s 以后的频率稳定度相对于 IGS 最终产品和 BIPM PPP 有 10% 左右的提升。

关键词: 时间频率传递; 全球导航卫星系统; 精密单点定位; 共视时间频率传递

中图分类号: TH714 P228.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.10

Improved PPP time and frequency transfer method based on PPP and common-view

Lu Runmin^{1,2,3}, Zhang Jie^{1,2,3,4}, Zhong Shiming^{1,2}, Han Jinyang^{1,2}, Liang Zihan^{1,2}

- (1. Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. National Geodetic Observatory, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: The PPP time and frequency transfer method is a high-precision time and frequency transfer method for GNSS that has the characteristics of high precision, wide range, and low cost. The CV time and frequency transfer method can eliminate the satellite clock and reduce path errors, such as ionospheric and tropospheric errors. This study combines the advantages of the two methods and implements an improved PPP time and frequency transfer method. In the experiment, five IGS stations are connected to UTC(k) and one external high-precision hydrogen clock is selected to form zero, short, and long baseline links to evaluate the performance of the improved PPP. The results show that when IGS final clock products are used as time reference, the time transfer accuracy of the improved PPP is improved by 2.55%~17.78% compared to PPP. The frequency stability can reach $2.0 \times 10^{-17}/600\ 000\ \text{s}$ for the zero-baseline link. The short-term frequency stability is better than that of PPP when the common-view satellite does not change in the zero-baseline, and the long-term frequency stability is comparable to that of PPP. The frequency stability of the improved PPP of each link in the non-zero baseline link after the average time of 10 000 s is improved by about 10% compared with the IGS final products and the BIPM PPP.

Keywords: time and frequency transfer; GNSS; precise point positioning; common-view time and frequency transfer

收稿日期: 2023-08-14 Received Date: 2023-08-14

* 基金项目: 湖北珞珈实验室开放基金(220100062)、国家自然科学基金面上基金(42174222)、中国科学院科研仪器研制项目(YJKYYQ20190062)、武汉市知识创新专项(2023010201010082)资助

0 引言

高精度的时间频率传递是国际守时实验室的重要工作之一。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术以其测量精度高、设备成本低、设站灵活的特点在国际守时实验室的时间频率传递中发挥着重要作用。自 20 世纪 80 年代以来,出现了多种基于 GNSS 的时间频率传递技术。Allan 等^[1]学者通过全球定位系统(global positioning system, GPS)实现了纳秒级的远程共视(common-view, CV)时间传递。自 2008 年以来,全视(all-in-view, AV)以其在远距离上具有更高的信噪比被用于计算国际原子时(international atomic time, TAI),但共视和全视均使用伪距观测值进行时间传递,受伪距观测噪声和多路径影响较大^[2]。正如 Petit 指出,只有在事后处理中有外部产品时,才可以使用全视^[2]。

随着国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)精密产品精度和时效性的提高,利用伪距和载波相位观测值的精密单点定位(precise point positioning, PPP)可以实现更高精度的时间频率传递,同时也用于 TAI 计算^[3]。2010 年张小红等^[4]利用 GPS PPP 技术进行时间传递,实现了精度 0.1~0.2 ns 的时间比对。2016 年 Petit 等^[5]基于 GPS 系统进行 PPP 时间传递,其统计不确定度约为 0.3 ns。2021 年 Petit 等^[6]利用具有整数模糊度分辨率的 PPP(precise point positioning with integer ambiguity resolution, IPPP)时间传递技术,实现了稳定度 $7 \times 10^{-16}/86\,400\text{ s}$ 的时间频率传递。2022 年 Petit 等^[7]将 IPPP 与光链路进行比较,发现 IPPP 可以在长达一个月的时间间隔内将协调世界时(coordinated universal time, UTC)链路的相对频率不确定度提高到 1×10^{-16} 以下。2023 年 Ren 等^[8]进行了 GPS PPP 时间频率传递,BRUX-SPT0 链路 PPP 和 IPPP 的频率稳定度分别可达到 $1.7 \times 10^{-15}/1.7\text{ d}$ 和 $1.8 \times 10^{-15}/1.7\text{ d}$ 。

本研究结合 PPP 和共视两种时间传递技术特点,首先将 PPP 和共视的优点相结合,提出了一种改进的 PPP 时间传递方法,该方法是在 PPP 的基础上选择一颗共视卫星,以共视的基本原理完成时间传递,因此该方法的适用距离与传统共视时间传递的距离相同;然后选取了 6 个外接高精度原子钟的 IGS 测站的 GPS 观测数据进行试验,分析了 PPP 和改进 PPP 两种方法的时间传递性能;最后总结了改进 PPP 相对 PPP 的优点和不足,并对后续的研究做出了展望。

1 方法与试验

该部分首先介绍了 GNSS 观测方程和双频消电离层组合模型,然后具体描述了改进 PPP 时间传递方法的原理,最后介绍了试验策略和方案。

1.1 GNSS 观测方程

一般情况下,GNSS 伪距 P 和载波 L 观测方程可以表示为^[9]:

$$\begin{aligned} P_{r,j}^{S,i} &= \rho_r^{S,i} + c(dt_r^S - dtr^{S,i}) + M_r^{S,i} \cdot Z_r + \gamma_j^S \cdot I_{r,1}^{S,i} + \\ & c(d_{r,j}^S - d_j^{S,i}) + \zeta_{r,j}^{S,i} \\ L_{r,j}^{S,i} &= \rho_r^{S,i} + c(dt_r^S - dtr^{S,i}) + M_r^{S,i} \cdot Z_r - \gamma_j^S \cdot I_{r,1}^{S,i} + \\ & \lambda_j^{S,i}(N_{r,j}^{S,i} + b_{r,j}^S - b_j^{S,i}) + \xi_{r,j}^{S,i} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $P_{r,j}^{S,i}$ 和 $L_{r,j}^{S,i}$ 分别表示伪距和载波观测值(单位为 m), S 和 i 表示卫星系统和卫星编号, r 和 j 分别表示接收机编号和频率号, $\rho_r^{S,i}$ 表示卫星与测站间的几何距离, dt_r^S 和 $dtr^{S,i}$ 表示接收机钟差和卫星钟差, c 为光速, $M_r^{S,i}$ 和 Z_r 分别表示湿投影函数和测站天顶湿对流层延迟, $I_{r,1}^{S,i}$ 表示倾斜电离层延迟, γ_j^S 表示电离层频率因子 ($\gamma_j^S = (\lambda_j^S/\lambda_1^S)^2$), $N_{r,j}^{S,i}$ 表示载波相位整周模糊度, $d_{r,j}^S$ 和 $d_j^{S,i}$ 表示与频率相关的接收机和卫星端未校正的伪距硬件延迟(uncalibrated code delay, UCD), $b_{r,j}^S$ 和 $b_j^{S,i}$ 分别表示与频率相关的接收机和卫星端未校正的相位硬件延迟(uncalibrated phase delay, UPD), $\zeta_{r,j}^{S,i}$ 和 $\xi_{r,j}^{S,i}$ 分别表示伪距和载波相位的观测噪声。

1.2 GNSS 双频消电离层组合观测方程

通过双频消电离层组合消除了一阶电离层延迟,组合观测方程可以表示为^[10-11]:

$$\begin{aligned} P_{r,IF}^{S,i} &= \alpha_1 \cdot P_{r,1}^{S,i} + \alpha_2 \cdot P_{r,2}^{S,i} = \mathbf{u}_r^{S,i} \cdot \mathbf{x}_r + \overline{cdt}_r^S + \\ & M_r^{S,i} \cdot Z_r + \zeta_{r,j}^{S,i} \\ L_{r,IF}^{S,i} &= \alpha_1 \cdot L_{r,1}^{S,i} + \alpha_2 \cdot L_{r,2}^{S,i} = \mathbf{u}_r^{S,i} \cdot \mathbf{x}_r + \overline{cdt}_r^S + \\ & M_r^{S,i} \cdot Z_r + \lambda_{IF}^{S,i} \cdot \overline{N}_{r,IF}^{S,i} + \xi_{r,IF}^{S,i} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $P_{r,IF}^{S,i}$ 和 $L_{r,IF}^{S,i}$ 表示伪距和载波相位的组合观测值(单位为 m), $\mathbf{u}_r^{S,i}$ 表示接收机到卫星的单位向量, \mathbf{x}_r 表示接收机位置增量向量。

其中, α_1 和 α_2 表示消电离层组合系数:

$$\alpha_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad \alpha_2 = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3)$$

其中,重新参数化的接收机钟差可以表示为:

$$\overline{cdt}_r^S = cdt_r^S + d_{r,IF}^S \quad (4)$$

其中, dt_r^S 为接收机钟差, $d_{r,IF}^S$ 为被接收机钟差吸收掉的差分码偏差(differential code bias, DCB)。

其中整周模糊度可以表示为:

$$\lambda_{IF}^{S,i} \overline{N}_{r,IF}^{S,i} = \lambda_{IF}^{S,i} (N_{r,IF}^{S,i} + b_{r,IF}^S - b_{IF}^{S,i}) - d_{IF}^{S,i} \quad (5)$$

1.3 时间传递原理

1) 共视和 PPP 时间传递原理

如图 1 是共视时间传递的原理,位于两地的接收机同一时刻观测同一颗卫星,得到本地时间与参考时间的偏差,然后两个测站数据交换作差,即可得到两地之间的钟差^[12-13]。

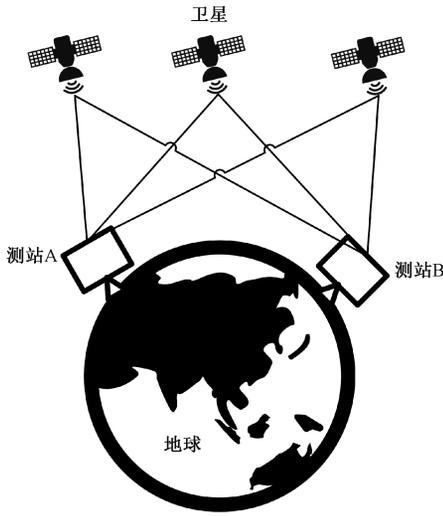


图1 共视时间传递原理

Fig. 1 Principle of common-view time transfer

假如测站 A 的本地时间为 t_A , 测站 B 的本地时间为 t_B , 参考时间为 t_{ref} , 则两地之间的钟差为:

$$\Delta t = (t_A - t_{ref}) - (t_B - t_{ref}) = t_A - t_B \quad (6)$$

图2是PPP的时间传递原理^[14], 测站 A, B 通过接收的伪距和载波相位观测值, 使用精密产品进行 PPP 解算, 分别得到 A, B 两站接收机时钟与参考时间的偏差, 即 d_{r_1} - 参考时间和 d_{r_2} - 参考时间, 最后将两站的钟差结果作差得到两地的时间传递结果, 即 $d_{r_1} - d_{r_2}$ 。

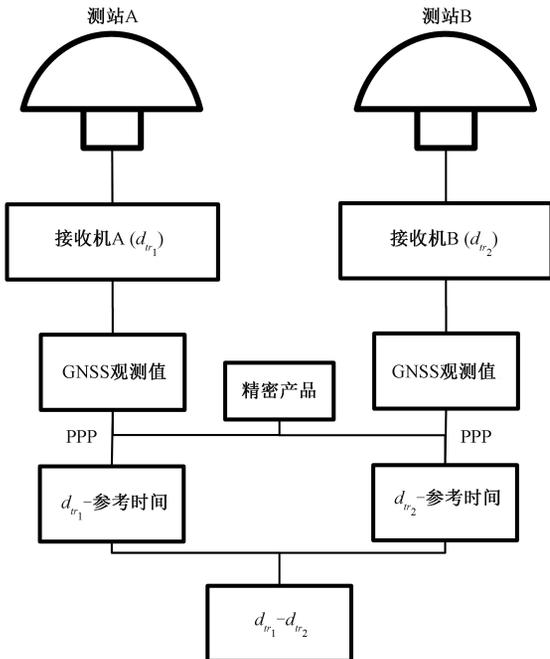


图2 PPP 时间传递原理

Fig. 2 Principle of PPP time transfer

2) 改进 PPP 时间传递原理

图3是改进PPP的时间传递原理, 具体方法如下:

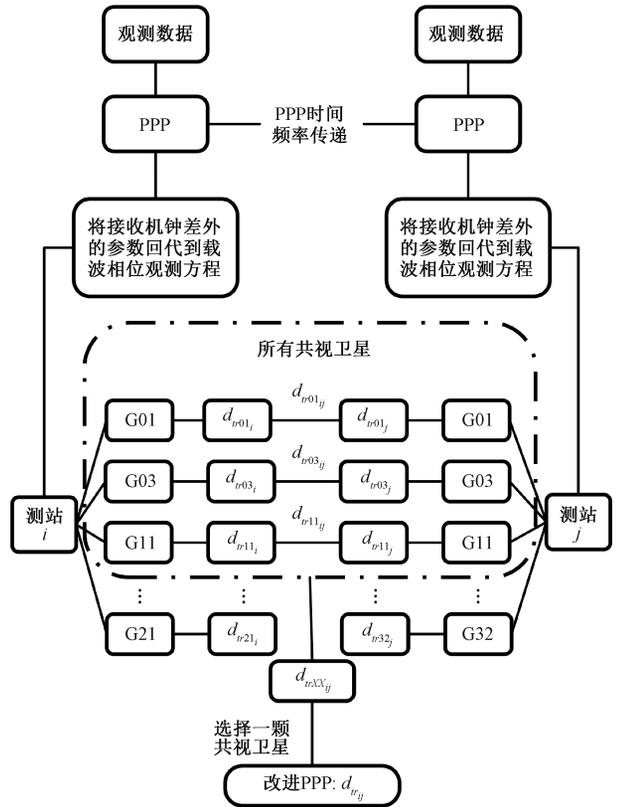


图3 改进 PPP 时间传递原理

Fig. 3 Principle of the improved PPP time transfer

(1) 通过式(2)给出的 PPP 双频消电离层模型, 解算得到接收机钟差等未知参数;

(2) 将第(1)步解算得到的除接收机钟差外的参数分别带回式(2)中的各个载波相位观测方程, 每个方程解得一个对应的接收机钟差, 即载波相位方程分别解得相对第 1、3、...、i 号卫星的接收机钟差 $\overline{dt}_{r,L}^{S,1}, \overline{dt}_{r,L}^{S,3}, \dots, \overline{dt}_{r,L}^{S,i}$;

(3) 如图3所示, 在每个历元中, 筛选出两个测站共同观测到的所有卫星, 将两测站第(2)步对应卫星的载波相位方程接收机钟差作差;

(4) 以第(3)步的结果为基础, 选择其中一颗卫星的两站钟差之差作为时间传递结果。由于卫星并不是一直可视, 因此需要分时段选择共视卫星。GPS 卫星的运行周期为 11 h 58 min, 在截止高度角为 15° 时, 单站单颗卫星最长可视时间约为 5 h, 两个测站间的距离进一步缩短了共视卫星的连续可视时长, 而选择的较短时段又会导致计算量增加, 本文以 1 h 为一个时间段。选择该时间段使得当天时间传递结果与 IGS 钟差比对 STD 最小的卫星作为共视卫星, 称该方法为改进 PPP 时间传递。

1.4 试验方案和策略

如图 4, 试验选取了 6 个外接高精度参考时钟的 IGS 测站, 并下载了 2021 年年积日 (day of year, DOY) 001-031、采样间隔为 30 s 的 GPS 观测数据, 表 1 是测站的具体信息, 除 ONSA 站外, 其余 5 个测站连接了 UTC(k) 作为外部频率源。另外, 基于选择的测站组成了长度不同的 4 条链路用于验证分析 PPP 和改进 PPP 的时间传递性能, 链路具体信息如表 2 所示。

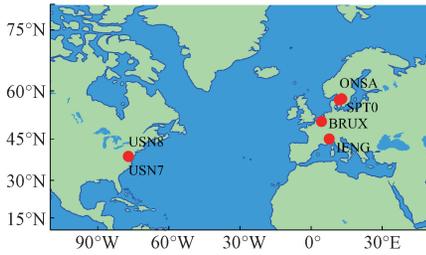


图 4 测站分布

Fig. 4 Site distribution of the stations

表 1 测站详细信息

Table 1 Details of the stations

测站	接收机	天线	外部频率源
USN7	POLARX5TR	TPSCR. G5	UTC(USNO)
USN8	POLARX5TR	TPSCR. G5	UTC(USNO)
BRUX	POLARX5TR	JAVRINGANT_DM	UTC(ORB)
SPT0	POLARX5TR	TRM59800.00	UTC(SP)
IENG	POLARX4TR	SEPCHOKE_MC	UTC(IT)
ONSA	POLARX5TR	AOAD/M_B	KVARZ.CH1-75A

表 2 链路详细信息

Table 2 Details of the links km

链路	长度
USN7-USN8	0
SPT0-ONSA	68
BRUX-SPT0	947
SPT0-IENG	1 455

试验中, 载波相位观测值的测量误差的标准差设置为 0.003 m, 伪距观测值与载波相位的测量误差的标准差比值为 100:1。表 3 是 PPP 双频消电离层的处理策略, 在卡尔曼滤波中, 载波相位偏差的过程噪声标准差为 0.000 1 m, 天顶对流层延迟的过程噪声标准差为 0.000 1 m, 卫星时钟稳定性的过程噪声标准差为 5×10^{-12} s/s。由于所选测站外部频率源的频率偏差, 两测站之间的钟差可能存在漂移, 无法直接用于评估传递

精度。因此, 采用 IGS 最终时钟产品作为时间参考真值来评估性能。计算方法如下:

$$\Delta t = (\overline{dt}_{r,i}^s - \overline{dt}_{r,j}^s) - (\hat{t}_{i,IGS} - \hat{t}_{j,IGS}) \quad (7)$$

其中, $\overline{dt}_{r,i}^s, \overline{dt}_{r,j}^s$ 是 i, j 两站解算钟差, $\hat{t}_{i,IGS}, \hat{t}_{j,IGS}$ 是 IGS 最终时钟产品中 i, j 两站的钟差。

表 3 处理策略

Table 3 Processing strategy

项目	处理方法
观测值	消电离层组合伪距/相位
卫星轨道和钟差	IGS 最终产品
截止高度角	15°
测站坐标	卡尔曼滤波估计
接收机钟差	白噪声模型 ($\sigma = 60$ m)
卫星天线影响	igs14.atx
对流层干延迟/湿延迟	模型改正/随机游走 ^[15-16]
卫星和接收机 DCB	CODE 产品改正 ^[17]
天线相位缠绕	模型改正 ^[18]
模糊度	浮点解

2 试验结果分析

2.1 零基线链路

零基线链路 USN7~USN8 的两个测站使用同一个天线和外部频率源。图 5 是该链路其中 6 天的钟差序列, 理论上钟差序列应该在 0 值附近, 由于天线到两台接收机以及两台接收机内部的延迟不同, 导致钟差序列出现一个系统偏差。表 4 是 PPP 和改进 PPP 时间传递这 6 天的统计结果, 与 IGS 比对的单天标准差 (standard deviation, STD) 均优于 30 ps, 由于共视差分削弱了未建模的大气误差, 改进 PPP 相对于 PPP 平均提升了 4.43%。

表 4 链路 USN7~USN8 钟差序列 STD

Table 4 STD of clock difference for the USN7-USN8 link

年积日	ps					
	003	004	005	006	007	008
PPP	23.6	15.3	9.6	9.0	8.6	14.3
改进 PPP	22.4	14.2	9.0	8.9	8.3	13.8

图 6 是链路 USN7~USN8 的 30 天钟差的修正 Allan 标准偏差, 在图 5 中可以看到, 由于改进 PPP 频繁切换共视卫星, 切换前后的钟差会出现跳变, 这导致改进 PPP

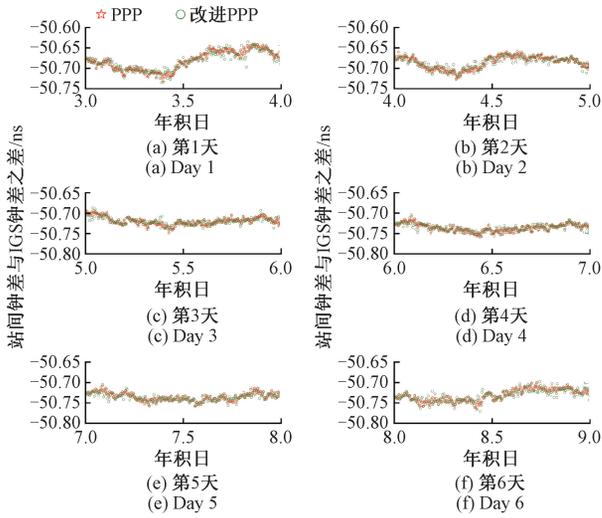


图5 链路 USN7~USN8 的 6 天钟差序列

Fig. 5 The 6-day clock difference of the link USN7~USN8

的频率稳定度在短期略差于 PPP。1 200~300 000 s 时间间隔时,改进 PPP 的频率稳定度相对于 PPP 平均提升了 21%,改进 PPP 的频率稳定度可达到 $2.0 \times 10^{-17} / 600\ 000\ s$ 。

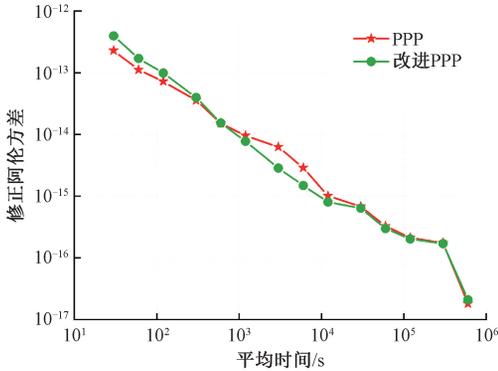


图6 链路 USN7~USN8 频率传递稳定度

Fig. 6 Frequency transfer stability of the USN7-USN8 link

同时为了验证切换共视卫星对改进 PPP 短期稳定度的影响,图 7 给出了该链路连续 3 h 选择同一颗共视卫星的两个时段的频率稳定度。图中可以看出在连续使用同一颗卫星的情况下,改进 PPP 的频率稳定度优于 PPP,30~1 200 s 时间间隔范围平均提升了 13.17%。

2.2 短基线链路

图 8 是链路 SPT0~ONSA 6 天的钟差与 IGS 最终产品比对结果,两种方法单天时间比对峰峰值均优于 0.15 ns,部分单天优于 0.10 ns。图 8 中,改进 PPP 使得大部分历元比对值向整体均值靠拢从而减小了 STD 值,但是切换共视卫星使切换前后链路钟差波动较大,对频率稳定度有一定影响。表 5 中链路 SPT0-ONSA 与 IGS 最终产品比对的单天 STD 均优于 30 ps,改进 PPP 相对于 PPP 平均提升了 8.38%。图 9 是链路 SPT0-ONSA 的

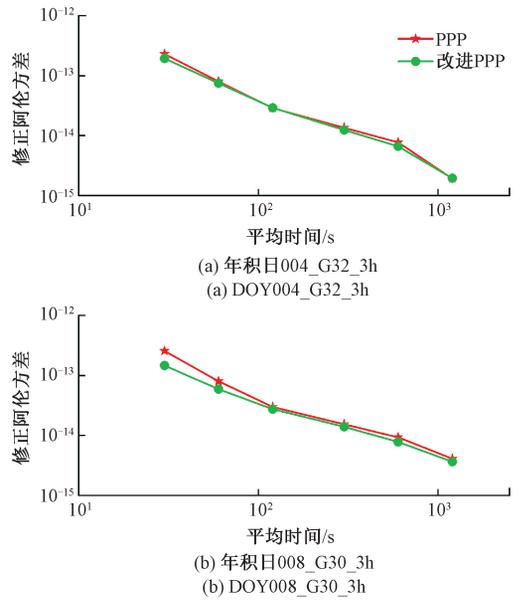


图7 链路 USN7~USN8 3 h 不切换共视频率传递稳定度
Fig. 7 Frequency transfer stability of the USN7-USN8 link when the CV satellite is not changed over three continuous hours

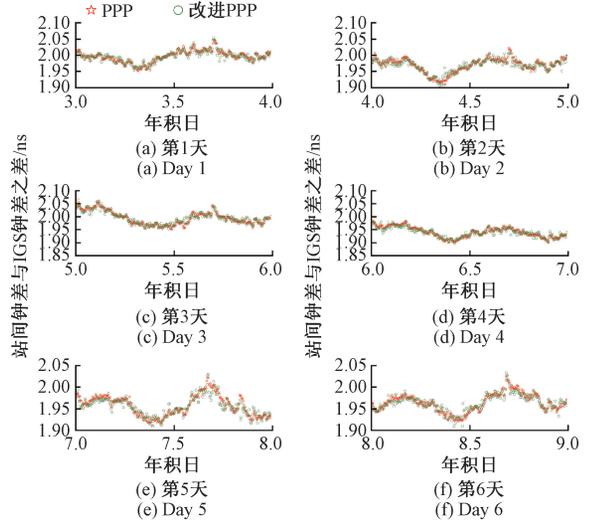


图8 链路 SPT0-ONSA 与 IGS 最终产品的单天时间比对结果
Fig. 8 Single-day time comparison results of the SPT0-ONSA link with respect to IGS final products

表5 链路 SPT0-ONSA 钟差与 IGS 最终产品比对 STD
Table 5 STD of time comparison for the SPT0-ONSA link with respect to IGS final products ps

年积日	003	004	005	006	007	008
PPP	17.5	21.6	25.5	19.9	23.8	20.9
改进 PPP	16.5	19.5	23.5	17.9	21.5	19.2

30 天钟差的修正 Allan 标准偏差,同时加入了该链路 IGS 最终产品的结果进行比较,由于该链路中 ONSA 测站没

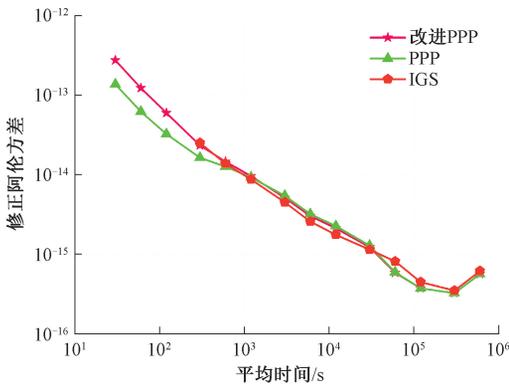


图 9 链路 SPT0-ONSA 的频率传递稳定度

Fig. 9 Frequency transfer stability of the SPT0-ONSA link

有 BIPM PPP 的数据,所以该链路没有与 BIPM PPP 结果进行比较。切换共视卫星同样导致该链路改进 PPP 短期频率稳定度略差于 PPP,时间间隔为 1 200 ~ 300 000 s 时,改进 PPP 略优于 PPP。当时间间隔为 12 000 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 和 PPP 性能相当,均优于 IGS 最终产品。

2.3 长基线链路

长基线链路选择了 BRUX-SPT0(947 km)和 SPT0-IENG(1 455 km)两条长度不同的链路,同时将 IGS 最终产品、国际计量局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM)给出的 PPP 钟差结果与 PPP 和改进 PPP 进行比较分析。

图 10 是链路 BRUX-SPT0 的 4 种钟差序列,由于没有精确校准各种延迟,PPP 和改进 PPP 相对 BIPM PPP 和 IGS 最终产品存在一定时间偏移,为了更好的分析比较,BIPM PPP 和改进 PPP 时间序列手动添加了 -24 ns 和 +0.5 ns 偏差。图 10 中五边形点代表 IGS 最终产品,由于每天的处理策略不同,导致天与天之间出现跳变现象。链路 BRUX-SPT0 30 天的结果与 IGS 最终产品比对的单日 STD 均优于 50 ps,改进 PPP 相对于 PPP 平均提升了 12.55%,提升比例高于 USN7 ~ USN8 和 SPT0-ONSA。图 11 是链路 BRUX-SPT0 的 30 天 4 种钟差的修正 Allan 标准偏差,当时间间隔为 12 000 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 的频率稳定度相对 PPP,平均提升了 4.92%;当时间间隔为 6 000 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 的频率稳定度相对 BIPM PPP,平均提升了 10.76%;当时间间隔为 300 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 的频率稳定度相对 IGS 最终产品,平均提升了 29.85%。

图 12 是链路 SPT0-IENG 的 4 种钟差序列,当链路长度达到 1 455 km,链路 SPT0-IENG 的 30 天的结果与 IGS 最终产品比对的单日 STD 均优于 50 ps,改进 PPP 相对于 PPP 平均提升了 10.33%,提升幅度低于链路 BRUX-

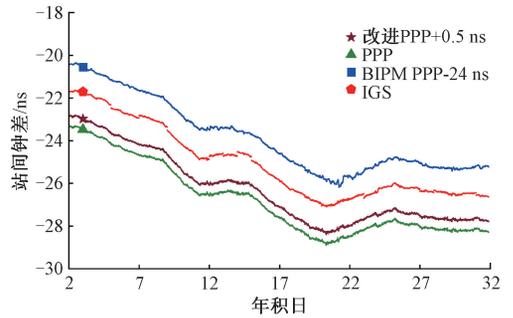


图 10 链路 BRUX-SPT0 的 30 天钟差序列

Fig. 10 The 30-day clock difference of the BRUX-SPT0 link

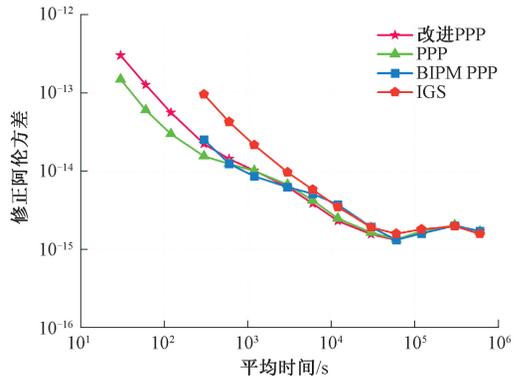


图 11 链路 BRUX-SPT0 的频率传递稳定度

Fig. 11 Frequency transfer stability of the BRUX-SPT0 link

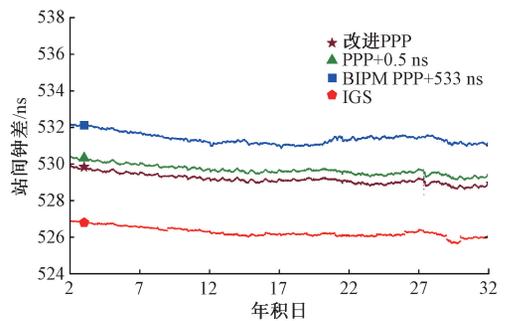


图 12 链路 SPT0-IENG 的 30 天钟差序列

Fig. 12 The 30-day clock difference of the SPT0-IENG link

SPT0,因为共视差分技术本身受距离限制站间距离越长链路对称性越小,差分削弱作用越小。如图 13 所示,在该链路 4 种钟差的修正 Allan 标准偏差中,当时间间隔为 12 000 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 的频率稳定度相对 PPP,平均提升了 8.49%;当时间间隔为 6 000 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 的频率稳定度相对 BIPM PPP,平均提升了 19.35%;当时间间隔为 60 000 ~ 600 000 s 时,改进 PPP 的频率稳定度相对 IGS 最终产品,平均提升了 20.03%。改进 PPP 的频率稳定度最终达到了 2.0×10^{-16} 。

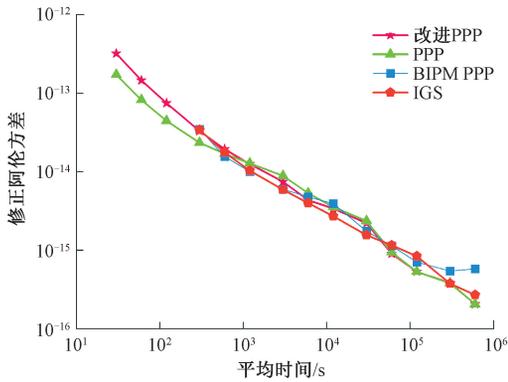


图 13 链路 SPTO-IENG 的频率传递稳定度

Fig. 13 Frequency transfer stability of the SPTO-IENG link

3 结 论

本研究结合共视和 PPP 时间传递技术的优点实现了一种改进的 PPP 时间传递方法,设计了改进 PPP 时间传递选择共视卫星的策略,开展了 PPP 和改进 PPP 的时间传递试验。结果表明,以 IGS 最终钟差产品为时间参考,改进 PPP 的时间传递精度相比 PPP 提高了 2.55%~17.78%;在连续观测同一颗卫星时,该方法的频率稳定度优于 PPP,相对 PPP、IGS 最终产品和 BIPM PPP 频率稳定度在时间间隔 10 000 s 以后提升了 10% 左右。该方法相对 PPP 等时间传递方法有一些方面的提升,但在选择共视卫星策略和改善换星跳变等问题仍需要进一步研究,后续会选择更多样的链路进行研究,以提高该方法的时间传递性能。

参考文献

- [1] ALLAN D W, WEISS M A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite[C]. In: Proceedings of the 1980 IEEE Frequency Control Symposium, Philadelphia, 1980; 334-346.
- [2] PETIT G, JIANG Z. GPS all in view time transfer for TAI computation[J]. Metrologia, 2008, 45(1), 35-45.
- [3] PETIT G, JIANG Z. Precise point positioning for TAI computation[C]. In 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, 2007; 395-398.
- [4] 张小红,蔡诗响,李星星,等. 利用 GPS 精密单点定位进行时间传递精度分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2010, 35(3):274-278.
ZHANG X H, CAI SH X, LI X X, et al. Accuracy analysis of time and frequency transfer based on precise point positioning[J]. Geomatics and Information Science

of Wuhan University, 2010, 35(3):274-278.

- [5] PETIT G, DEFRAIGNE P. The performance of GPS time and frequency transfer: Comment on 'A de-tailed comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques' [J]. Metrologia, 2016, 53(3):1003.
- [6] PETIT G. Sub-10-16 accuracy GNSS frequency transfer with IPPP[J]. GPS Solutions, 2021, 25(1), 1-9.
- [7] PETIT G, MEYNADIER F, HARMEGNIES A, et al. Continuous IPPP links for UTC[J]. Metrologia, 2022, 59(4), 5007.
- [8] REN Z, LYU D, GONG H, et al. Continuous time and frequency transfer using robust GPS PPP integer ambiguity resolution method[J]. GPS Solutions, 2023, DOI:10.1007/s10291-023-01420-w.
- [9] LEICK A, RAPOPORT L, TATARNIKOV D. GPS satellite surveying, 4th edn[C]. Wiley, Hoboken, 2015.
- [10] SHI J, GAO Y. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods[J]. GPS Solutions, 2014, 18(4), 519-528.
- [11] 张继海,董绍武,袁海波,等. GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 39-47.
ZHANG J H, DONG SH W, YUAN H B, et al. Study on multi-system GNSS data fusion technology in PPP time comparison[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5):39-47.
- [12] 张健,董绍武,武文俊,等. GPS 多接收机加权组合共视时间比对[J]. 时间频率学报, 2020, 43(3): 175-184.
ZHANG J, DONG SH W, WU W J, et al. GPS multi-receiver weighted combined common-view time comparison[J]. Journal of Time and Frequency, 2020, 43(3):175-184.
- [13] 张鹏飞,涂锐,高玉平,等. 基于北斗的时间传递方法及其精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2700-2706.
ZHANG P F, TU R, GAO Y P, et al. Beidou time transfer method and its accuracy analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2700-2706.
- [14] GE Y, CHEN S, WU T, et al. An analysis of BDS-3 real-time PPP: Time transfer, positioning, and tropospheric delay retrieval[J]. Measurement, 2021, 172, DOI: org/10.1016/j.measurement. 2020.108871.
- [15] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bulletin Géodésique, 1946—

1975, 105:278-298.

- [16] NIELL A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B2), 3227-3246.
- [17] 韩金阳, 张杰, 钟世明, 等. 差分码偏差对PPP授时精度影响的研究 [J]. *导航定位与授时*, 2021, 8(6): 131-137.
- HAN J Y, ZHANG J, ZHONG SH M, et al. Study on the influence of differential code bias on PPP timing precision [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2021, 8(6): 131-137.
- [18] WU J, WU S, HAJJ G, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase [J]. *Astrodynamics*, 1992, 18: 1647-1660.

作者简介



路润民, 2021年于武汉大学获得学士学位, 现为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院博士研究生, 主要研究方向为事后高精度时间传递。

E-mail: lurunmin@apm.ac.cn

Lu Runmin received his B. Sc. degree from Wuhan University in 2021. He is currently a master student at Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is post high precision time transfer.



张杰 (通信作者), 2010年于中国地质大学获得学士学位, 2015年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院高级工程师, 主要研究方向为高精度时间频率传递及其应用, 卫星激光测距等。

E-mail: zhangjie@apm.ac.cn

Zhang Jie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China University of Geosciences in 2010, and received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2015. He is currently a senior engineer at Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include high-precision time and frequency transfer and its applications, SLR.



钟世明, 1997年于武汉测绘科技大学获得学士学位, 2000年于武汉测绘科技大学获得硕士学位, 2006年于中国科学院测量与地球物理研究所获得博士学位, 现为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院副研究员, 主要研究方向为卫星定轨、GNSS精密单点定位和卫星激光测距数据处理。

E-mail: zhongshiming@apm.ac.cn

Zhong Shiming received his B. Sc. degree from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping in 1997, received his M. Sc. degree from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping in 2000, and received his Ph. D. degree from Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences in 2006. He is currently an associate professor at Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include satellite orbit determination, GNSS precise point positioning, and SLR data processing.



韩金阳, 2020年于太原理工大学获得学士学位, 现为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院博士研究生, 主要研究方向为接收机钟差建模、GNSS动态时间传递技术等。

E-mail: goldensun_han@apm.ac.cn

Han Jinyang received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include receiver clock modeling, and GNSS dynamic time transfer.



梁子涵, 2022年于武汉大学获得学士学位, 现为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院硕士研究生, 主要研究方向为实时时间传递技术研究。

E-mail: liangzihan@apm.ac.cn

Liang Zihan received her B. Sc. degree from Wuhan University in 2022. She is currently a master student at Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences. Her main research interest is real-time time transfer.