

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-02-0176-07

基于初始运行阶段 Galileo PPP 国际时间传递^{*}

欧阳明俊^{1,2,3}, 杨旭海^{1,2,4}, 孙保琪^{1,2,4}, 葛玉龙^{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;

4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

摘要:当前 GNSS 国际时间传递主要依赖 GPS 系统, 增加利用 BeiDou, Galileo 等新兴卫星导航系统可以进一步提高国际时间传递的可靠性和精确度。2016 年 12 月 15 日, Galileo 系统正式宣布开始提供初始服务。为了验证探索初始运行阶段 Galileo 系统用于国际时间传递可能达到的效果, 选取 7 个外接有高精度时间频率信号的 GNSS 跟踪站, 以精密单点定位(PPP)模式开展 Galileo 国际时间传递试验。试验选取从 2016-12-15 至 2017-05-01 共 138 d 的观测数据, 以 1 d 为弧长, 逐天处理, 采用 GPS 系统精密单点定位方法为参考进行比较。从未知参数设置、分析中心产品、精密钟差采样间隔、频点选取等方面, 对不同的解算策略进行了分析比较。结果表明, 基于本次试验选取的各个策略, 6 条时间传递链路 Galileo 系统与 GPS 系统作差得到时间序列, 其统计标准偏差均在 0.2~0.6 ns 之间。随着多 GNSS 的蓬勃发展, 试验对未来多系统国际时间传递提供一定的参考意义。

关键词:伽利略; 初始服务; 精密单点定位; 国际时间传递

PPP time transfer based on Galileo initial service

OUYANG Ming-jun^{1,2,3}, YANG Xu-hai^{1,2,4}, SUN Bao-qi^{1,2,4}, GE Yu-long^{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;

4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: GPS precise point positioning has become one of the main methods for International Atomic Time computation. The reliability and precision of TAI would be increased with development of Multi-GNSS systems such as Galileo and BeiDou. In December 15, 2016, the European Commission, operator of the European Galileo global navigation satellite system, officially announced the launch of the Galileo initial service. This contribution investigates the performance of PPP time transfer with the Galileo constellation in the initial service phase. Seven stations were selected to do Galileo PPP time transfer experiments with excellent external clocks. Daily RINEX files of 138 days, with a 30 s sampling interval, were collected from

* 收稿日期: 2018-10-20; 接受日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11703033, 11173026, 41104021); 陕西省自然科学基金资助项目(2018JQ1020); 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目(XAB2018B19, XAB2017B11); 国家科技部国家科技基础条件平台资助项目(DKA2017-12-02-24)

作者简介: 欧阳明俊, 男, 硕士, 主要从事卫星导航定位定时研究。

December 15, 2016 until May 1, 2017, seven solutions were designed with different options on the parameter selection, products utilization and the sampling interval selection. For most links and solutions, the Standard Deviation of time transfer differences between Galileo PPP and GPS PPP ranged from 0.2 ns to 0.6 ns. With the fast development of Galileo system, Galileo PPP technique would play an important role in time transfer.

Key words: Galileo; initial service; precise point positioning; international time transfer

0 引言

精密单点定位技术(precise point position, PPP)是 1997 年由美国喷气推进实验室 J. F. Zumberge 等人提出的^[1]。该技术使用单台接收机采集的双频码伪距和载波相位观测值,以及 IGS(International GNSS Service)提供的精密卫星轨道和精密钟差产品,采用非差模型进行未知参数的解算,其定位精度在水平方向可以达到 1 cm,高程方向可以达到 2 cm^[1]。2006 年,CCTF(Consultative Committee for Time and Frequency)建议增加载波相位时间传递链路,以进行综合原子时的归算。2009 年开始,GPS PPP 成为国际原子时(TAI)例行时间传递技术^[2]。截至 2017 年 2 月,根据国际权度局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)的 T 公报,全球有 76 个时间实验室参与国际时间比对,其中有 28 个时间实验室采用了 GPS PPP 的方法,有 10 个实验室采用了卫星双向时间传递与 PPP 结合的方法^[3]。

当前国际时间比对链路中,只使用到了 GPS 和 GLONASS 系统的观测值^[3]。当前基于载波相位时间传递的研究,也主要基于 GPS 系统开展。加拿大自然资源部(Natural Resource Canada)开发的 NRcan-PPP 软件^[4],被 BIPM 时间传递部门用于 TAI 的试算。2004—2006 年,BIPM 的江志恒博士和 G. Petit 使用 GPS PPP 方法得到亚纳秒量级的时间传递精度,并且指出 GPS PPP 用于时间传递的短期稳定度优于 TWSTFT(two-way satellite time transfer)^[5]。2014 年中国科学院国家授时中心广伟等进行了 BDS PPP 实验得出了 BDS PPP 时间传递短稳可以达到 $1 \times 10^{-13}/960 \text{ s}$, $1 \times 10^{-14}/\text{d}$ ^[6]。2017 年国家授时中心张立等对多系统产品应用于 GPS PPP 时间传递进行了比对^[7]。

随着 Galileo, BDS 等新兴导航系统的蓬勃发展,利用 GNSS 多系统 PPP 方法时间传递,将有助于提高 UTC/TAI 计算的可靠性和准确度。Galileo 系统于 2016 年 12 月 15 日正式对外宣布提供初始化运行服务(initial service),论文利用部分外接高精度原子钟的 GNSS 站点,试验探索基于初始运行阶段 Galileo 系统,进行 PPP 国际时间传递的策略与可能达到的效果,并从未知参数设置、分析中心产品、精密钟差采样间隔、频点选取等方面,对不同的解算策略进行了分析比较。

1 数据与方法

基于试验的目的,试验选取了部分国际时间比对链路,采用 PPP 方法进行解算,本节将介绍具体选取的数据与解算策略。

1.1 PPP 方法原理

码伪距与载波相位观测方程如下所示:

$$P_j^s = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s + d_{\text{trop}}^s + I_j^s + c(d_r + d_i^s) + \epsilon_p, \quad (1)$$

$$\Phi_j^s = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s + d_{\text{trop}}^s - I_j^s + \lambda_j N_j^s + \epsilon_\Phi, \quad (2)$$

式(1)和(2)中, s 代表卫星编号, P_j^s 代表码伪距在 j 频点的观测值, Φ_j^s 代表载波相位在 j 频点观测值, ρ 代表卫星与接收机之间几何距离, c 代表光速, δt 为接收机钟差, δt^s 为卫星钟差, d_{trop}^s 代表对流层延迟误差, I_j^s 代表 j 频点电离层延迟误差, d_r, d_i^s 分别代表接收机硬件延迟与卫星硬件延迟, λ_j 代表 j 频点载波相位波长, N_j^s 代表 j 频点模糊度, $\epsilon_p, \epsilon_\Phi$ 分别代表码伪距与载波相位观测噪声。

PPP 技术自从诞生以来,发展了多种数学模型,比较有代表性的数学模型包括传统模型,非差非组合模型,UofC 模型,消模糊度模型。传统模型也就是消电离层组合,由于电离层误差在接近地平线方向最大可以

达到 100 m 以上,目前的电离层模型均不能对其精确改正,消电离层组合为在两个频率码伪距观测值,载波相位观测值之间形成观测方程,能够有效消除消电离层一阶项的影响,故消电离层组合得到了广泛的应用。

消电离层组合计算公式如下:

$$P_{\text{IF}} = \frac{f_1^2 \cdot P_1 - f_2^2 \cdot P_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (3)$$

$$\Phi_{\text{IF}} = \frac{f_1^2 \cdot \Phi_1 - f_2^2 \cdot \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, P_{IF} 码代表伪距消电离层组合, Φ_{IF} 代表载波相位消电离层组合。

1.2 PPP 时间传递原理

使用 PPP 方法进行时间传递,先使用双频码伪距和载波相位观测值以及精密产品,解算测站时钟与参考时间尺度 IGST 的偏差,之后两站作差运算得出时间传递结果。

在使用 PPP 进行时间传递时,各站点接收机外接对应的原子钟,然后使用精密轨道和精密钟差产品,利用单台 GNSS 接收机观测值进行 PPP 解算,获得本地时钟 $T_{\text{clk},a}$, $T_{\text{clk},b}$ 与公共参考时间 (T_{IGST}) 之间的差值,再对两个测站解得的钟差进行差分运算得到两地原子钟之间的时间偏差,得到时间传递结果。图 1 为 PPP 时间传递原理图,计算方程具体如下:

$$T_{\text{clk},a} - T_{\text{clk},b} = [(T_{\text{clk},a} - T_{\text{IGST}}) - (T_{\text{clk},b} - T_{\text{IGST}})]. \quad (5)$$

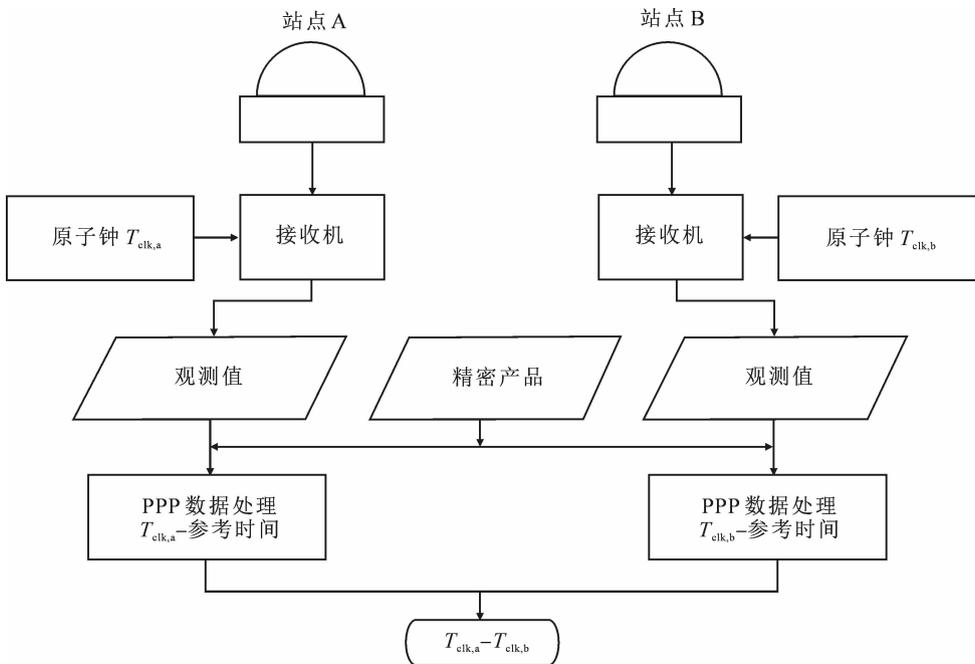


图 1 PPP 时间传递原理图

1.3 观测数据及精密产品

在使用 PPP 方法进行高精度时间传递时,各站点的接收机需要外接原子钟,以维持高精度且稳定的频率源。根据具有 Galileo/GPS 跟踪能力和外接高精度时间参考两个条件,从 IGS 跟踪网和 TAI 国际时间传递网选取 7 个 GNSS 跟踪站进行试验,除 PT11 站点不是 IGS MGEX (multi-GNSS experiment) 站,其余 6 个均为 MGEX 站点。其中 PT11, BRUX, ROAP, DLF1, USN8 为位于时间实验室站点。试验数据弧段从 2016 年 12 月 15 日开始,到 2017 年 5 月 1 日结束共 138 d,观测数据的采样间隔为 30 s。

图 2 是本次试验选取站点分布图。在国际时间比对链路时间实验室站点中,PT11 站点位于德国联邦物理技术研究所 (PTB),也是当前国际时间比对链路中心节点。

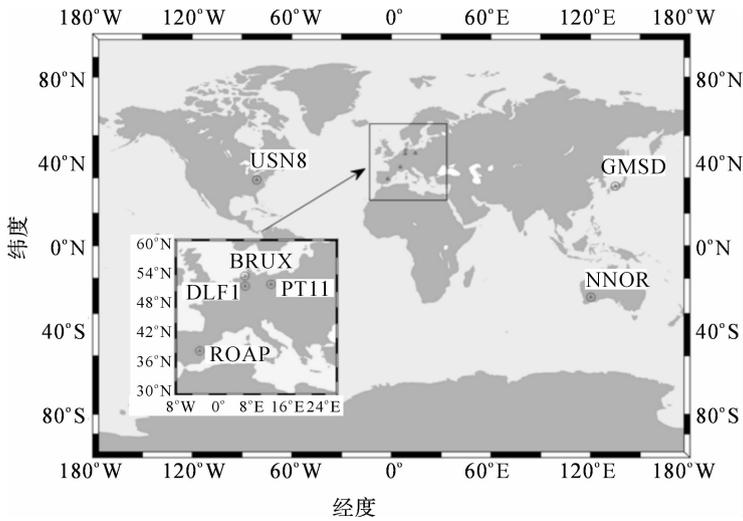


图 2 试验选取站点分布图

GBM 是 IGS MGEX 分析中心 GFZ 提供的包含有 Galileo 系统的多系统产品,COM 是 IGS MGEX 分析中心 CODE 提供的包含有 Galileo 系统的多系统产品。试验选取的站点所用接收机、天线配置以及外接原子钟,详细情况如表 1 所示。

表 1 选取的站点具体配置情况

站点名称	接收机类型	外接原子钟
PT11	SEPT POLARX4TR	H-MASER
BRUX	SEPT POLARX4TR	CESIUM
ROAP	SEPT POLARX4TR	H-MASER
DLF1	TRIMBLE NETR9	CESIUM
GMSD	TRIMBLE NETR9	CESIUM
NNOR	SEPT POLARX4	SLAVED CRYSTAL
USN8	SEPT POLARX4TR	H-MASER

1.4 解算策略

本次试验使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(可解算四系统),分别对 Galileo 系统和 GPS 系统进行 PPP 解算。参数估计采用加权最小二乘,未知参数包括测站坐标、对流层天顶延迟、接收机钟差、载波相位模糊度 4 类。解算的基本策略设置如表 2 所示。

表 2 PPP 时间传递解算基本策略

项目类型	改正模型
对流层模型	GMF, 干分量模型改正; 湿分量参数估计
频点选择	GPS L1/L2; Galileo E1/E5a E1/E5b
观测值定权	$1/\cos^2 Z$, 码和载波相位权比: 1 : 100
固体潮	IERS 2010
海潮	IERS 2010
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
模糊度处理	浮点解

为进一步试验未知参数设置、分析中心产品、精密钟差采样间隔、频点选取等方面,不同解算策略对 Galileo PPP 时间传递的影响。本次试验选取了表 3 中所列 7 种策略进行比对分析。

表 3 7 种策略的选取情况

	GBM	COM	坐标固定	对流层固定	坐标对流层均固定	30 s 采样率钟差	300 s 采样率钟差
策略 1	✓					✓	
策略 2	✓		✓			✓	
策略 3	✓			✓		✓	
策略 4	✓				✓	✓	
策略 5	✓						✓
策略 6	✓					✓	
策略 7		✓					✓

1.5 评价方法

TAIPPP 是 BIPM 为计算国际原子时而采用 PPP 技术解算的各时间实验室钟差,使用时延小于 3 d 的 IGS 快速产品 IGR。BIPM 解算 TAIPPP 使用的软件是由加拿大自然资源部开发的 NRCAN-PPP 软件,本文则使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(可处理四系统)。另外两种软件使用的解算策略也有所不同,部分解算策略比较如表 4 所示。

表 4 TAIPPP 的解算 NRCAN-PPP 软件与 Bernese 5.2 软件 PPP 解算策略比较表

处理项目	TAIPPP 的解算 NRCAN-PPP 软件	Bernese 5.2 软件
精密产品	IGR	IGR/GBM/COM
一阶电离层延迟	消电离层组合	消电离层组合
钟差采样间隔	5 min	5 min/30 s
对流层延迟湿分量部分	参数估计	参数估计
数据处理弧段	35 d	1 d
参数估计方法	卡尔曼滤波	最小二乘

从表 4 可以看出,两个软件处理策略具有较大的差异,因此,验证 Benrese 5.2 软件在 PPP 数据处理能够达到的精度,目的是比较验证在同一条链路中,使用相同数据,相同产品的条件下,不同软件以及不同解算策略对时间传递结果的影响,也为后文能够以该软件,该策略做时间传递试验提供可信基准。

本次试验所用软件和策略,用于评估 Galileo PPP 时间传递的可行性,在 2017 年 IGS Workshop 所做的报告《BeiDou and Galileo Carrier-Phase Time Transfer toward TAI Computation International GNSS Service》已经得到验证^[8]。该报告中,采用 Bernese 5.2 软件,使用与 BIPM 相同的数据和产品,比较 GPS PPP 策略选择和 BIPM 公布的月结果。该试验中从 MGEX 站点中选择了 6 个站,所有 6 个站为位于参与国际原子时时间比对的时间实验室,数据选取的时段是从 2015 年 1 月到 2017 年 5 月。试验得到结论,采用 Bernese 5.2 软件,GPS PPP 方法时间传递采用表 3 中策略 1,这也是本次 Galileo PPP 采用的基本策略,得到的时间链路单天解算结果,其与 BIPM TAIPPP 月公布结果 STD (Standard Deviation) 在 0.1 ns 左右,意味着采用该软件与该策略,作为 Galileo PPP 单天时间传递评估标准是可行的。

以 Galileo PPP 计算得到时间传递链路钟差序列与 GPS PPP 结果作差的统计 STD,来衡量 Galileo PPP 时间传递能够达到的效果。具体计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((t_{\text{GPS_PPP}(i)} - t_{\text{Galileo_PPP}(i)}) - \mu)^2}, \quad (6)$$

式(6)中, $t_{\text{GPS_PPP}(i)}$ 表示 GPS PPP 其 138 d 解算得到钟差时间序列, $t_{\text{Galileo_PPP}(i)}$ 表示 Galileo PPP 整体 138 d 钟差时间序列, μ 表示 138 d 里 GPS PPP 减去 Galileo PPP 时间序列均值, N 为时间序列采样点个数。

2 结果与分析

本次试验从未知参数设置、分析中心产品、精密钟差采样间隔、频点选取等方面所选取的 7 种策略均采用 GPS 系统,GBM 产品,钟差采样率为 30 s,以及 L1/L2 频点的策略,也就是表 3 中策略 1,为参考作差进行比对统计。从图 3 中 7 种策略 STD 统计结果可以看出:除了个别链路,个别策略作差时间序列 STD 统计结果大于 0.6 ns,总体在 0.2~0.6 ns 之间。

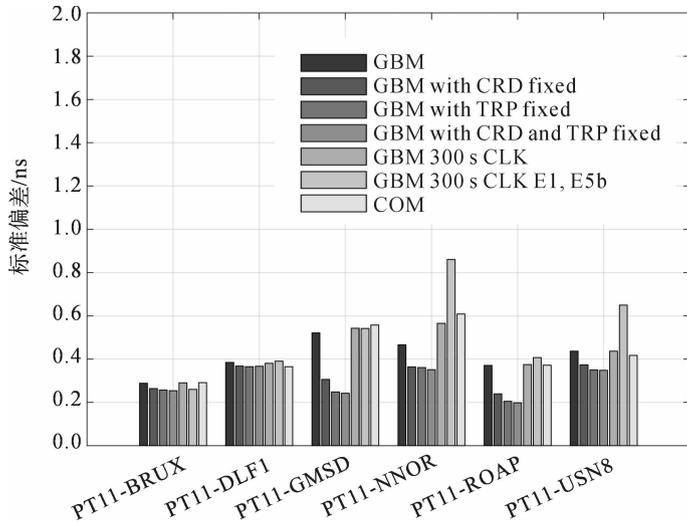


图 3 7 种策略 Galileo PPP 减去 GPS PPP 的 STD 统计结果

从图 3 中统计结果可以看出,固定坐标,固定对流层策略 Galileo PPP 与 GPS PPP 作差得到的统计 STD,所有链路均有不同程度减小,说明固定参数对 Galileo PPP 解算有靠近作用;采用 GBM 产品或者 COM 产品,所有试验链路统计 STD 差异小于 0.1 ns,说明采用不同的多系统产品, Galileo PPP 时间传递几乎没有差异;而采用 300 s 采样间隔钟差,以及采用 E1/E5b 频点数据解算,这两种策略相对于基本策略,不同链路统计 STD 差异不同,无明显趋势,但各策略统计量级差均在 0.3 ns 以内。

表 5 为采用 Galileo PPP 表 3 中策略 1,也就是使用 Galileo 系统、采用 GBM 产品、30 s 钟差、E1/E5a 两个频点观测数据进行解算,以 GPS PPP 为参考作差统计结果。从表中可以看出,STD 均在 0.2~0.6 ns 之间。RMS(root mean square)值统计差异较大,原因在于本文只强调分析时间传递的稳定度,未对设备时延等系统误差进行标校。

表 5 策略 1 Galileo PPP 减去 GPS PPP 统计结果 ns

时间链路	STD	RMS
PT11-BRUX	0.287 9	1.930 0
PT11-DLF1	0.384 6	26.634 1
PT11-GMSD	0.521 0	21.330 6
PT11-NNOR	0.466 4	0.468 7
PT11-ROAP	0.370 9	0.399 5
PT11-USN8	0.436 9	3.723 8

图 4 为使用表 3 中的策略 1,6 条时间比对链路 Galileo PPP 解算时差结果与 GPS PPP 时差结果作差得到的时差序列图。部分链路比对结果出现缺失是由于观测数据的缺失或数据质量较差导致解算失败。从链路比较结果可以看出,在 138 d 作差时差序列图中,GPS PPP 方法相较于 Galileo PPP 方法,其幅度在上下 2 ns 之间,意味着解算效果表现较为稳定。

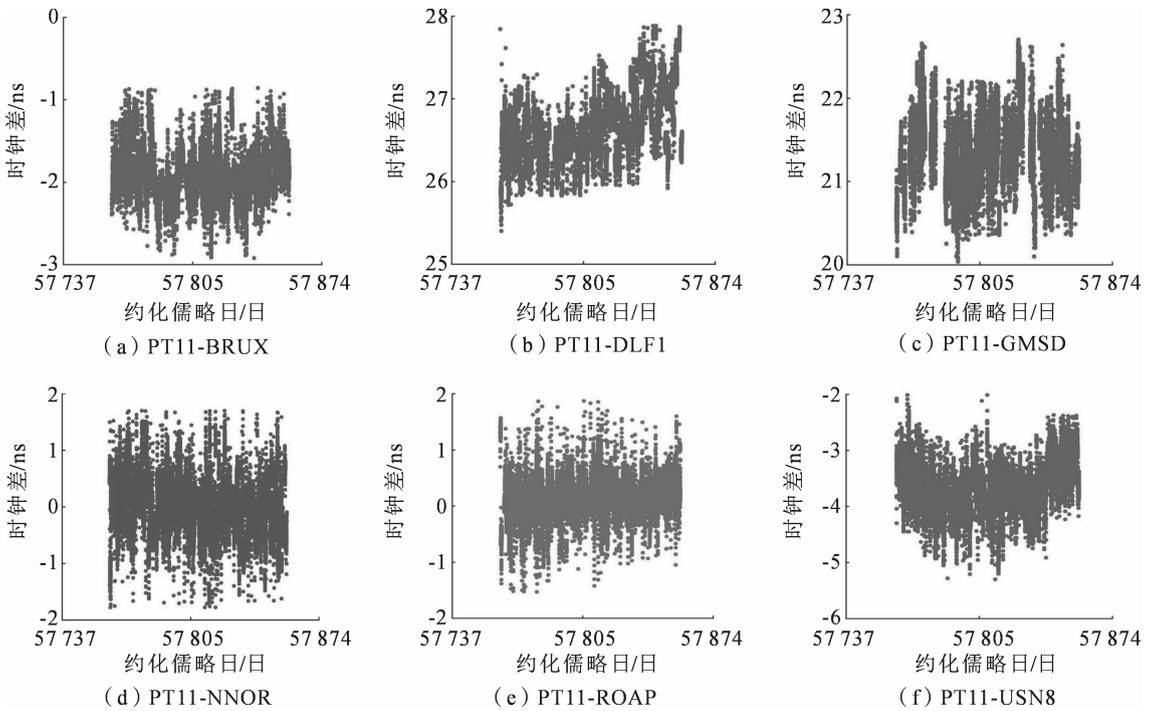


图 4 策略 1 Galileo PPP 减去 GPS PPP 时间链路结果

3 结语

本文利用多系统精密轨道钟差产品,选取 Galileo 系统宣布初始化运行后,连续 138 d 观测数据,采用 PPP 方法进行时间传递试验,探索 Galileo PPP 时间传递效果。从未知参数设置、分析中心产品、精密钟差采样间隔、频点选取等方面,对不同解算策略进行了分析比较。试验结果表明,当前 Galileo 卫星系统尚未全面建成的情况下,采用文中所示 7 种策略,以 GPS PPP 方法为参考,与其作差并进行统计,6 条时间比对链路的统计 STD 均在 0.2~0.6 ns 之间。此结果可为 Galileo 系统远程时间传递,UTC/TAI 时间比对等提供一定参考。

致谢:感谢 IGS MGEX 提供的多系统产品和观测数据;感谢 PTB 提供包含有 Galileo 系统的观测数据;感谢 iGMAS 提供的资助。

参考文献:

- [1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [2] PETIT G, HARMEGNIES A, MERCIER F, et al. The time stability of PPP links for TAI[J]. *Frequency Control and the European Frequency and Time Forum*, 2011, 797(10): 1-5.
- [3] BUREAU International des Poids et Mesures. BIPM Annual Report on Time Activities[R]. 2015: 21.
- [4] 雷雨, 高玉平. NRCAN-PPP 在线时间传递服务系统精度分析[C]//第二届中国卫星导航学术年会电子文集, 上海: 第二届中国卫星导航学术年会会务组, 2011.
- [5] PETIT G, JIANG Z. GPS All in View time transfer for TAI computation[J]. *Metrologia*, 2008, 45(1): 35.
- [6] GUANG W, ZHANG P F, YUAN H B, et al. The research on carrier phase time transfer of BeiDou navigation satellite system[J]. *European Frequency and Time Forum*, 2015: 113-117.
- [7] 张立, 孙保琪, 武文俊, 等. 基于 IGS MGEX 产品分析 GPS PPP 时间传递[J]. *时间频率学报*, 2018, 41(2): 88-94.
- [8] SUN Bao-qi, GE Yu-long, OUYANG Ming-jun, et al. BeiDou and Galileo carrier-phase time transfer toward TAI computation international GNSS service[C]//IGS Workshop 2017, Paris, France, 2017.