

引用格式: 姚攀, 杨旭海, 孙保琪, 等. 基于 CNES 实时多系统产品 PPP 时间传递[J]. 时间频率学报, 2020, 43(4): 288-299.

基于 CNES 实时多系统产品 PPP 时间传递

姚攀^{1,2,3}, 杨旭海^{1,2,4}, 孙保琪^{1,2,4}, 武美芳^{1,2}

- (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: IGS (International GNSS Service) 实时产品精度的不断提高, 为开展基于 IGS 实时产品的 PPP (precise point positioning) 时间传递试验提供了有力条件。为了探索实时多系统产品应用于时间传递所能达到的效果, 本文获取 IGS 分析中心法国空间研究中心 (CNES) 2018年5月1日至2019年4月30日共365 d的实时多系统产品, 利用7个测站的365 d观测数据, 从不同 GNSS (Global Navigation Satellite System) 系统组合、截止高度角的变化两个角度, 设计了多种试验策略并进行 PPP 解算。结果表明, 基于 CNES 实时 GPS (Global Positioning System) 单系统产品得到的时间传递链路结果与使用 IGR 产品得到的时间传递链路结果作差, 两者差异的标准偏差 (STD) 在 0.3~0.5 ns 之间; 利用多种组合模式的多系统产品得到的 STD 相较于 GPS 单系统有所减小, 在截止高度角为 10°, 20°, 30° 时, STD 减小的百分比分别为 11.11%~13.89%, 10.81%~16.21%, 11.42%~12.82%。

关键词: 精密单点定位; 时间传递; 多系统; 实时产品

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-04-0288-12

PPP time transfer based on CNES real-time GNSS products

YAO Pan^{1,2,3}, YANG Xu-hai^{1,2,4}, SUN Bao-qi^{1,2,4}, WU Mei-fang^{1,2}

- (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 Astronomical and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The continuous improvement of the accuracy of IGS real-time products provides a opportunity for testing and performance evaluation of PPP (precise point positioning) time transfer by using IGS (International GNSS Service) real-time products. In order to study the effect on time transfer by using real-time multi-GNSS products in this work, 1-year real-time multi-GNSS products from the IGS Analysis Center's Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) and observational data from 7 stations are used to evaluate the strategy of different GNSS system combinations and cut-off height angle. The results show that the standard deviation of

time transfer difference between CNES real-time GPS-only products and the IGR products is around 0.3 ns to 0.5 ns. In summary, compared to the GPS-only system, the STD obtained by multi-GNSS products is reduced: the STD is reduced by 11.11% - 13.89%, 10.81% - 16.21%, 11.42% - 12.82%, at a cut-off height angles of 10°, 20°, 30°, respectively.

Key words: precise point positioning; time transfer; multi-GNSS; real-time products

0 引言

共视法和全视法是国际权度局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 主要使用的两种 GNSS 时间传递方法, 但共视法、全视法都是基于伪距观测值的时间传递方法, 其受伪距观测噪声和多路径效应影响较大^[1-2]。为了克服这些缺点, 研究人员采用基于载波相位的精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术来实现时间传递^[3-4]。BIPM 首先将 GPS PPP 技术用于国际原子时 (International Atomic Time, TAI) 比较, 结果表明, GPS PPP 时间传递的 A 类不确定度为 0.3 ns^[5]。2009 年开始, GPS PPP 成为国际原子时例行时间传递技术之一^[6]。目前大多学者基本都是使用事后产品进行 GPS PPP 时间传递研究。2017 年中国科学院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]。BIPM 基于 IGS 快速产品 IGR 开展 GPS PPP 时间传递^[8]。虽然都能够实现纳秒级和亚纳秒的时间传递, 但是无法满足对时效性要求较高的用户。从 2013 年 4 月 1 日起, IGS-RTS (International GNSS Service Real Time Service) 正式发布和运行^[9], 基于全球实时跟踪站的观测数据和广播星历, 生成实时的卫星轨道和钟差改正数。用户可以实时获取 IGS 及其各个分析中心播发的实时产品, 结合实时广播星历生成高精度的卫星轨道和钟差, 服务于对产品时效性要求较高的用户。目前, 关于 PPP 时间传递的研究重点在事后模式, 而实时 PPP 时间传递的研究也处于初步阶段, 且仅限 GPS PPP。随着北斗等新兴导航系统的快速发展, 利用实时多系统产品采用 PPP 技术进行时间传递, 将有助于提高时间传递的可靠性。

近年来, 精度不断提高的 IGS 实时产品, 为开展基于 IGS 实时产品以精密单点定位 (PPP) 模式进行时间传递试验提供了有力条件。本文对 IGS 分析中心法国空间研究中心 (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) 的实时轨道与钟差产品的完整性进行统计与分析, 并以 IGS 快速产品 IGR PPP 解算结果作为外部参考, 利用轨道与钟差产品, 选取不同 GNSS 系统组合, 即仅 GPS, GPS+BDS, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, 以及截止高度角的变化进行 PPP 解算, 开展基于 CNES 实时产品 PPP 时间传递试验。

1 PPP 方法与 PPP 时间传递原理

1.1 PPP 方法原理

利用 IGS 实时精密轨道、精密卫星钟差产品以及使用消电离层组合消除电离层影响后的双频组合观测值, 采用 PPP 方法进行时间传递试验, 其观测方程可表示为:

$$P = \rho + c \cdot T_r - c \cdot T_s + d_{\text{trop}} + \varepsilon(P), \quad (1)$$

$$\Phi = \rho + c \cdot T_r - c \cdot T_s + d_{\text{trop}} + \varepsilon(\Phi) + \lambda \cdot N, \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中, P 代表无电离层伪距组合观测值, Φ 代表无电离层相位组合观测值, ρ 代表信号发射时刻卫星位置与接收机接收信号时刻接收机位置之间的几何距离, T_r 代表接收机钟差, T_s 代表卫星钟差, c 代表真空中的光速, N 代表无电离层组合相位观测值的模糊度, $\varepsilon(P)$ 和 $\varepsilon(\Phi)$ 分别代表两种组合

观测值的观测噪声及其他测量误差。 d_{trop} 代表对流层延迟误差的改正, 可表示为

$$d_{\text{trop}} = H_{\text{dry}} \cdot M_{\text{dry}} + H_{\text{wet}} \cdot M_{\text{wet}}, \quad (3)$$

式(3)中, H_{dry} 和 H_{wet} 分别为天顶方向上对流层延迟干分量和湿分量, M_{dry} 和 M_{wet} 分别代表对流层延迟干分量的映射函数和对流层延迟湿分量的映射函数, 而 H_{dry} 通过 Saastamonient 等模型进行修正, H_{wet} 作为未知参数通过解算得到。

1.2 PPP 时间传递基本原理

采用 PPP 方法进行时间传递时, 基于测站 A, B 的载波相位观测值和码伪距观测值, 使用精密轨道与钟差产品, 进行 PPP 解算, 得到测站 A, B 的接收机时钟与共同的参考时间之间的偏差, 即 $T_{\text{CLK1}} - \text{参考时间}$ 和 $T_{\text{CLK2}} - \text{参考时间}$, 再对测站 A 与测站 B 解算得到的钟差结果进行差分运算, 得到两地的时间传递结果即 $T_{\text{CLK1}} - T_{\text{CLK2}}$ 。PPP 时间传递基本原理如图 1 所示。

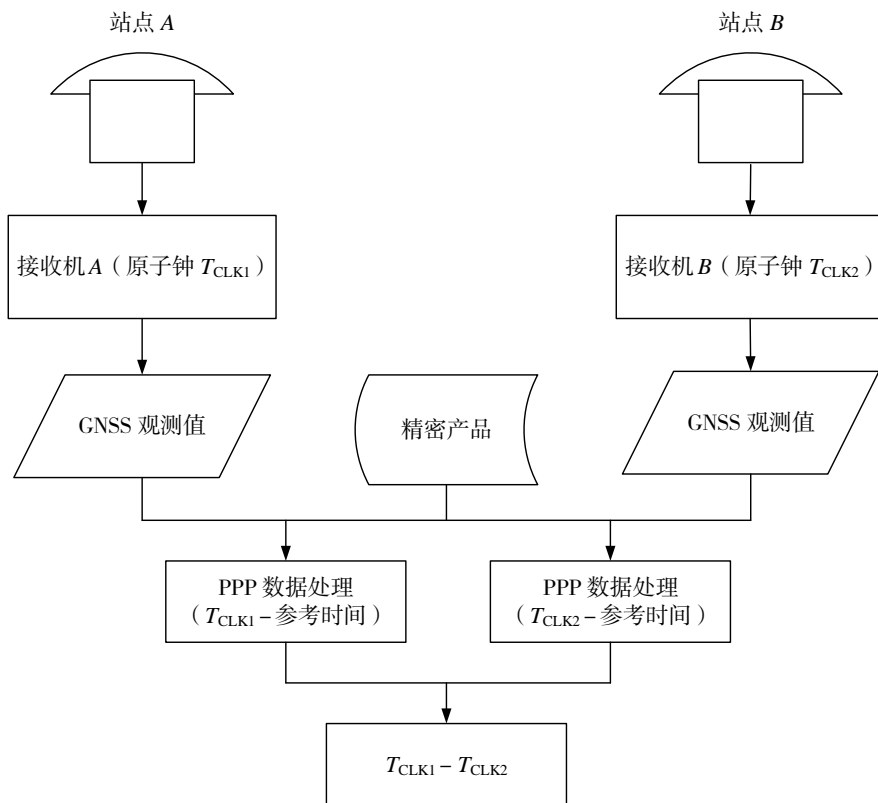


图 1 PPP 时间传递基本原理图

2 实验数据与策略

2.1 观测数据

本次试验选取 7 个外接高精度时间参考的 GNSS 跟踪站, 7 个测站均是 IGS MGEX (multi-GNSS experiment) 站点, 其中 WAB2, PTBB, BRUX 是位于时间实验室的站点, 各个测站的接收机均外接高精度原子钟。图 2 是本次试验选取测站的站点分布图, 其中 BRUX 作为本次试验的中心节点。观测数据弧段从 2018 年 5 月 1 日开始, 到 2019 年 4 月 30 日结束共 365 d, 其采样间隔为 30 s。

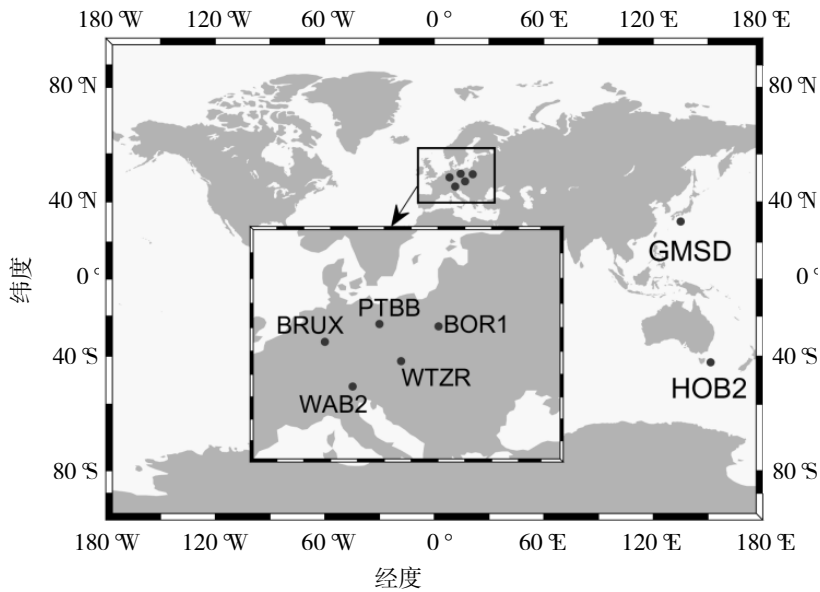


图 2 试验站点分布图

本次试验选取的所有站点接收机、天线配置以及外接原子钟，详细情况如表 1 所示。

表 1 站点配置信息统计

站点名称	接收机类型	天线类型	外接原子钟
PTBB	SEPT POLARX4TR	LEIAR25.R4 LEIT	UTC (PTB)
BRUX	SEPT POLARX4TR	JAVRINGANT_DM	CH1-75A MASER
WAB2	ASHTECH Z-XII3T	ASH700936F_C	UTC (CH)
HOB2	SEPT POLARX5	AOAD/M_T	H-MASER
GMSD	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	Cesium
BOR1	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	H-MASER
WTZR	LEICA GR25	LEIAR25.R3	H-MASER

2.2 实时产品及其完整性分析

进行实时产品的可用性分析时，主要从两个方面进行分析：第一个方面是实时产品完整性问题，受实时产品数据源等因素的影响，造成实时接收的数据不完整；第二个方面是产品时延问题，即实时产品延迟不能大于 90 s，目前 IGS 实时产品基本满足这一要求^[10]。因此，本文主要对从 2018 年 5 月 1 日至 2019 年 4 月 30 日共 365 d 实时数据流的完整性进行了分析。

由表 2 可知，CNES 实时产品数据完整性存在以下两个问题：① 实时产品数据不连续，多系统的实时产品数据完整率都没有达到 100%，部分卫星的数据完整率较低，比如 E13，E15 和 E21 号卫星数据完整率低于 50%。② 多系统的实时产品中，GPS 和 GLONASS 的实时产品整体完整率均高于 90%，而 Galileo 和 BDS 的实时产品整体完整率分别为 70.66%和 84.34%。以上两个问题可能是数据源部分卫星数据缺失或数据流中断等因素造成的。

表 2 实时产品数据完整率统计

卫星 PRN 号	完整率/%	卫星 PRN 号	完整率/%	卫星 PRN 号	完整率/%	卫星 PRN 号	完整率/%
G01	95.022	G24	95.257	R17	93.598	E24	83.477
G02	95.327	G25	94.837	R18	92.960	E25	65.583
G03	94.905	G26	94.922	R19	93.352	E26	82.116
G05	95.651	G27	94.831	R20	94.028	E27	65.035
G06	95.325	G28	95.878	R21	93.969	E30	82.111
G07	95.892	G29	95.546	R22	93.521	E31	59.446
G08	95.388	G30	95.801	R23	94.063	C01	71.374
G09	95.238	G31	94.566	R24	94.027	C02	77.272
G10	95.950	G32	95.137	E01	84.720	C03	68.565
G11	95.628	R01	93.635	E02	83.933	C04	63.798
G12	95.543	R02	94.039	E03	80.758	C05	81.126
G13	95.877	R03	93.643	E04	79.640	C06	90.031
G14	95.549	R04	94.065	E05	81.215	C07	91.936
G15	95.544	R05	0.0943	E07	81.081	C08	92.497
G16	94.968	R07	93.017	E08	84.992	C09	93.455
G17	95.863	R09	93.304	E09	85.452	C10	92.107
G18	81.104	R10	94.061	E11	71.486	C11	87.252
G19	95.424	R11	94.062	E12	80.226	C12	90.853
G20	95.427	R13	94.037	E13	16.929	C13	92.244
G21	95.419	R14	94.036	E15	17.229	C14	88.262
G22	95.474	R15	93.287	E19	80.668		
G23	95.490	R16	74.811	E21	47.132		

2.3 解算策略

本次实验主要在静态模式下, 利用 CNES 多系统实时产品, 选取不同 GNSS 系统组合, 即 GPS, GPS+BDS, GPS+GLONASS 和 GPS+Galileo, 以及截止高度角的变化, 分别设置为 10° , 20° 和 30° , 开展 PPP 时间传递试验。PPP 解算时, 使用无电离层组合模型, 参数估计使用卡尔曼滤波方法, 详细的数据处理解算策略设置如表 3 所示。

表 3 PPP 数据处理解算策略

项目	处理方法
观测值	无电离层组合伪距/相位
卫星轨道和钟差	SSR 改正数+广播星历
卫星 PCO/PCV 影响	igs14.atx
对流层干延迟/湿延迟	模型改正/随机游走
天线相位缠绕	模型改正
截止高度角	10° , 20° , 30°
测站坐标	参数估计
模糊度	浮点解

3 评价方法

本文使用基于 IGS 快速产品 IGR PPP 解算的结果作为外部参考标准,来衡量 CNES 实时多系统产品的时延传递能够达到的效果,主要有两个原因:第一,BIPM 计算国际原子时,使用 IGS 快速产品 IGR,采用 PPP 技术解算得到各时间实验室钟差,其可比性更强;第二,IGS 快速产品 IGR 的钟差精度高达 $0.075 \text{ ns}^{[8]}$,可以满足精密时间传递的需求。不选择精度更高的 IGS 最终产品,主要是因为 IGS 最终产品的时延较长,且 IGR 产品精度也符合要求^[11]。

此次试验将利用 CNES 实时产品 PPP 解算得到的时间传递链路钟差序列,与使用 IGR 产品(截止高度角为 10° ,其他参数设置相同)PPP 解算得到的时间传递链路钟差序列作差,统计差异 STD(standard deviation)作为评估标准,具体计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ((t_{\text{SSR}(j)} - t_{\text{IGR}(j)}) - u)^2}, \quad (4)$$

式(4)中, $t_{\text{SSR}(j)}$ 表示使用 IGS 实时产品 PPP 解算得到的时间传递链路结果, $t_{\text{IGR}(j)}$ 表示使用 IGR 产品解算得到的时间传递链路结果, u 表示 $t_{\text{SSR}(j)}$ 减去 $t_{\text{IGR}(j)}$ 时间序列的均值, N 为采样点个数。

本次试验使用 Stable32 软件计算得到时间传递链路钟差序列的修正 Allan 偏差(modified Allan deviation, MDEV),并通过修正 Allan 偏差来判断 PPP 时间传递的稳定度^[12-13]。

4 实验结果与分析

本次实验首先利用 CNES 实时产品中的 GPS 系统产品,设置截止高度角为 10° ,进行 PPP 解算,得到所有试验链路的时间链路结果与使用 IGR 产品得到的时间链路结果作差,并对差异结果进行统计。图 3 分别是 BRUX-PTBB 和 BRUX-WAB2 的时间链路结果序列图,从中可以发现,使用 CNES 实时产品中的 GPS 单系统产品和使用 IGR 产品两者的解算结果符合程度较好。图中部分时段链路比对结果缺失是观测数据缺失或观测数据质量较差导致解算失败而引起的。BRUX-BOR1, BRUX-GMSD, BRUX-HOB2 和 BRUX-WTZR 这 4 条链路比对结果呈现相同的趋势,相应的时间序列图这里不再一一展示。

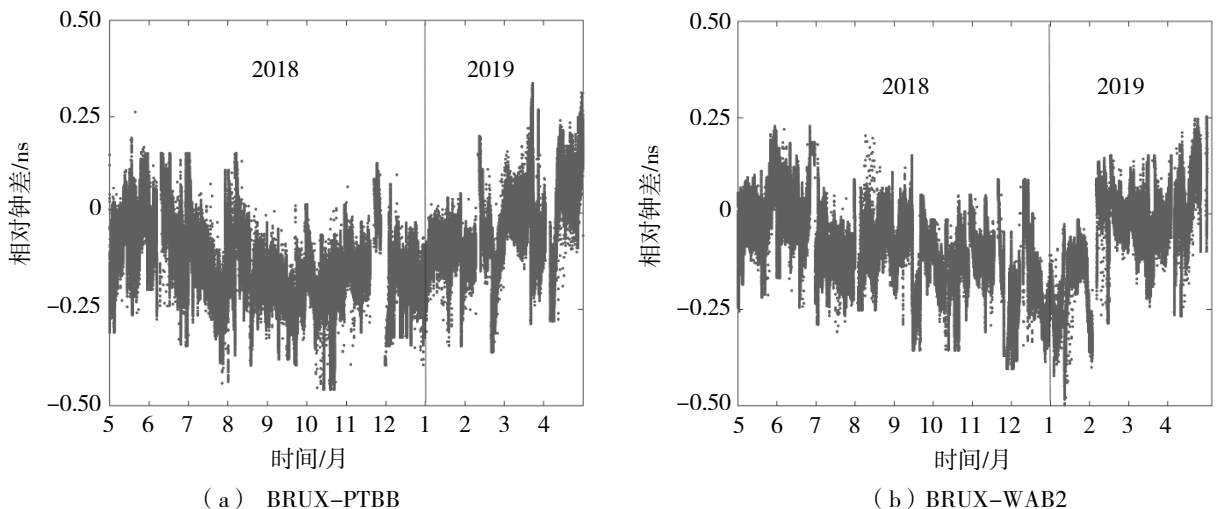


图 3 GPS PPP (CNES) - GPS PPP (IGR) 结果比对时间序列图

表 4 是 GPS (CNES) - GPS PPP (IGR) 时间链路比对结果 STD 的统计,从统计结果可以看出

BRUX-BOR1, BRUX-GMSD 等 6 条时间传递链路比对结果的 STD 值均在 0.1~0.5 ns 之间。结合图 4 可以看出,使用 CNES 实时 GPS 单系统产品所得的链路 BRUX-PTBB 的 PPP 时间传递的稳定度和使用 IGR 产品所得到的稳定度接近,天稳分别可以达到 6.6×10^{-15} 和 6.4×10^{-15} 。

表 4 GPS PPP (CNES) -PPP (IGR) 比对结果标准偏差统计 单位: ns

时间链路	标准偏差
BRUX-BOR1	0.304
BRUX-GMSD	0.431
BRUX-HOB2	0.380
BRUX-PTBB	0.153
BRUX-WAB2	0.180
BRUX-WTZR	0.331

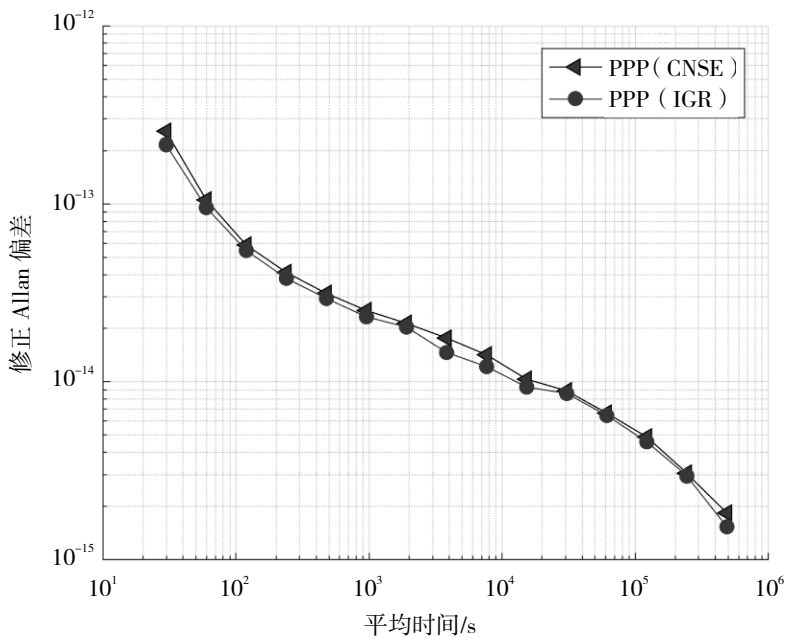


图 4 不同产品 GPS PPP 解算的 BRUX-PTBB 的修正 Allan 偏差

在上述基础上,基于 CNES 多系统实时产品,截止高度角设置为 10° ,选择 GPS+BDS, GPS+GLONASS 和 GPS+Galileo 不同星座之间组合进行 PPP 解算。由于 PTBB, WAB2 这两个测站的观测值是 GPS 单系统,所有在进行不同星座之间组合解算时, BRUX, BOR1, GMSD, HOB2 和 WTZR 这 5 个测站进行解算。图 5 是 PPP (CNES) 时间链路结果与 GPS (IGR) 时间链路结果差值的 STD 值统计,从图中可以看出,使用 CNES 多系统实时产品中 GPS+BDS, GPS+GLONASS 和 GPS+Galileo 不同星座之间组合进行 PPP 时间传递,其 STD 均小于 0.4 ns。图 6 是 BRUX-BOR1, BRUX-GMSD, BRUX-HOB2 和 BRUX-WTZR 4 条链路使用 CNES 多系统实时产品与 GPS 单系统实时产品 STD 减小的百分比统计图,从图中可以发现,使用 CNES 多系统实时产品 STD 值有所减小,其中 BRUX-HOB2 和 BRUX-GMSD 两条时间链路结果 STD 明显减小,主要原因是利用 CNES 多系统实时产品相比 GPS 单系统实时产品,可以使用的卫星数据更多,图 7 和图 8 分别显示了 2017 年,年积日为 150, BRUX 和 GMSD 两个测站不同星座组合的可视卫星数量和钟差精度因子 TDOP (time dilution of precision) 值,从图 7 和图 8 中可以看出,相比 GPS 单系统, BRUX

和 GMSD 测站不同 GPS+BDS, GPS+GLONASS 和 GPS+Galileo 不同星座之间组合, TDOP 明显减小, 其中 BRUX 测站 GPS 平均 TDOP 为 1.02, GPS+BDS 平均 TDOP 为 0.70, GPS+GLONASS 平均 TDOP 为 0.66, GPS+Galileo 平均 TDOP 为 0.77。整体来看, 在使用 CNES 实时多系统产品 GPS+GLONASS 组合进行 PPP 时间传递试验, 其 STD 小于 GPS+BDS、GPS+Galileo 组合, 主要原因 GLONASS 实时产品数据完整率高于 BDS 和 Galileo。图 9 是使用 CNES 实时产品中不同系统组合 PPP 解算的 BRUX-HOB2 的 MDEV, 不难发现使用 CNES 多系统实时产品所得的链路 BRUX-HOB2 的 PPP 时间传递的稳定度优于使用 GPS 单系统实时产品所得到的稳定度。

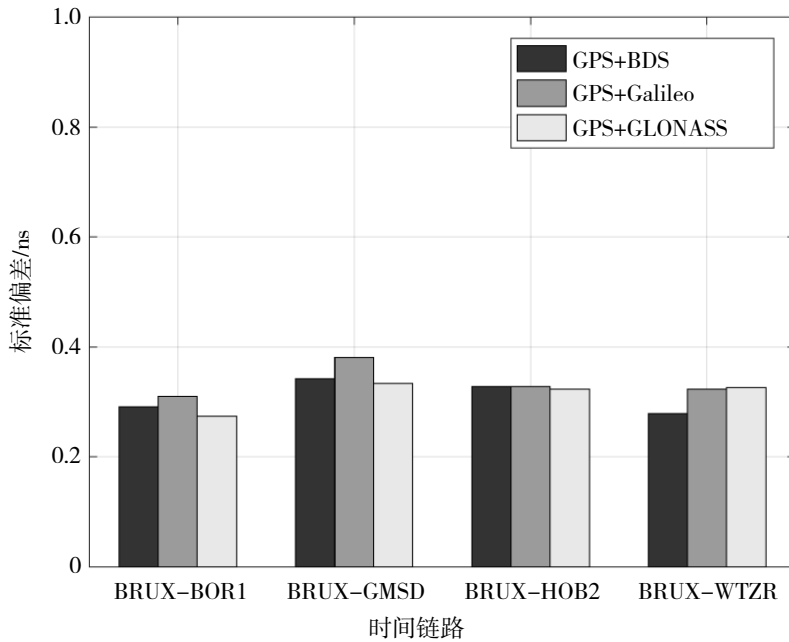


图 5 PPP (CNES) -PPP (IGR) 比对结果标准偏差值统计

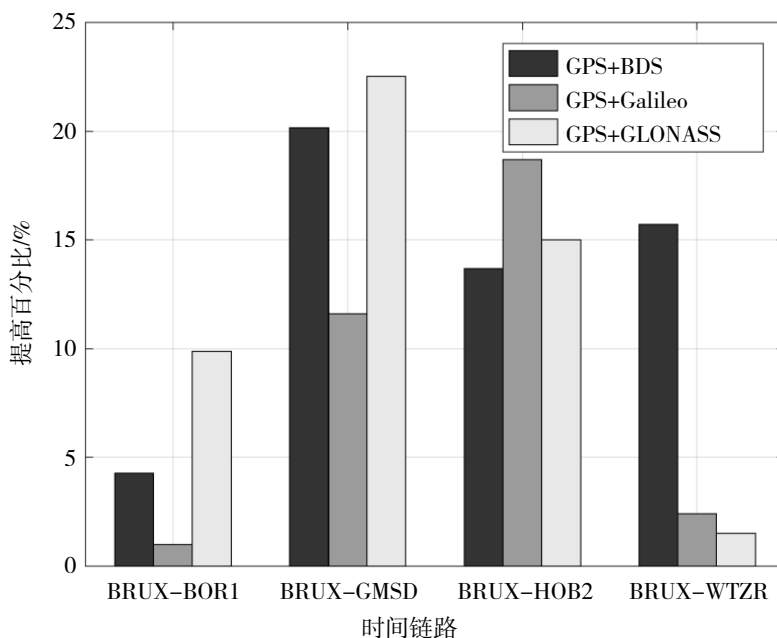


图 6 使用多系统产品相对于使用单 GPS 实时产品时间传递标准偏差值减小百分比统计

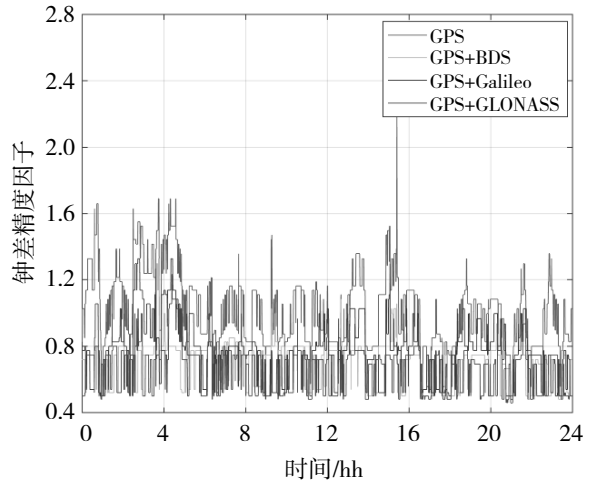
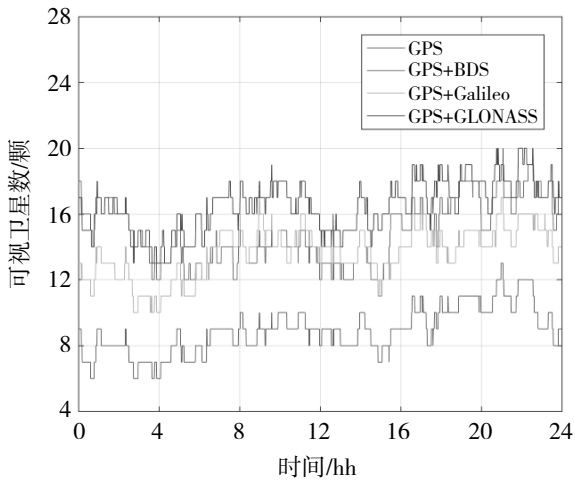


图 7 BRUX 站可视卫星数和钟差精度因子

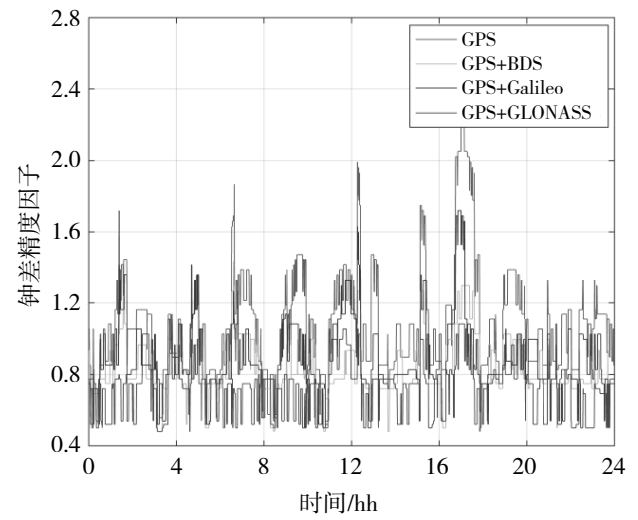
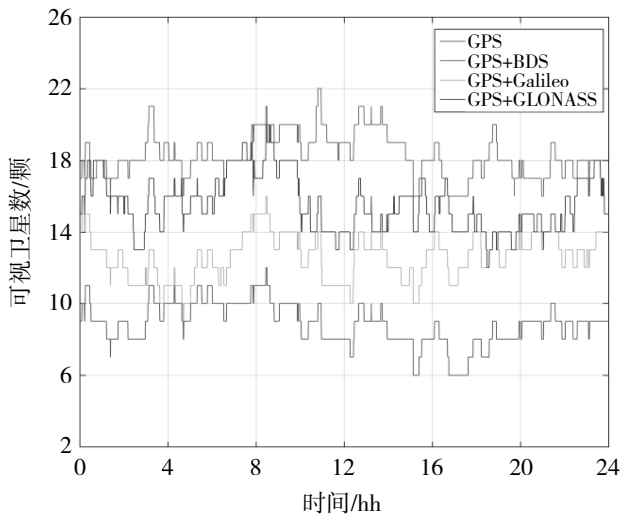


图 8 GMSD 站可视卫星数和钟差精度因子

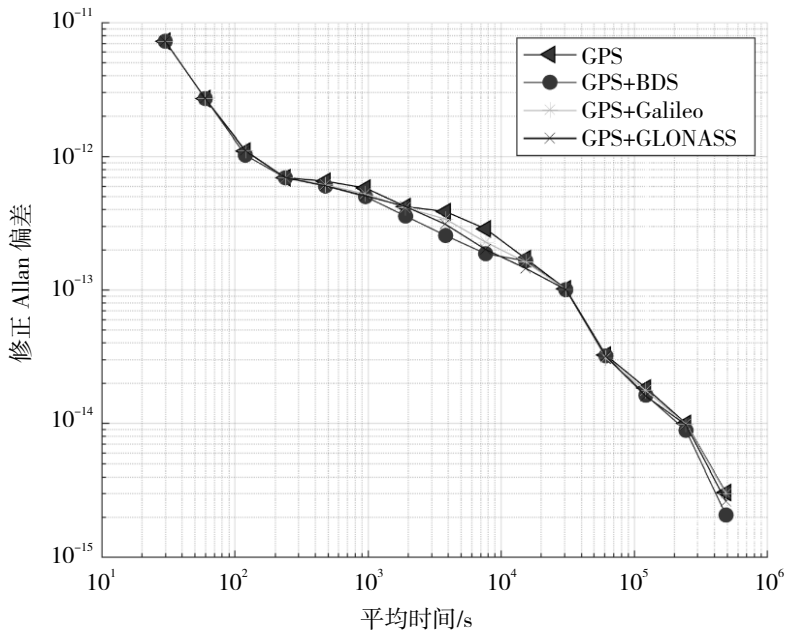


图 9 实时产品中不同系统组合 PPP 解算的 BRUX-HOB2 的修正 Allan 偏差

上述试验结果都是基于良好的观测条件下得出的，而现实中的观测条件存在不确定性。因此，我们模拟开展了在外界环境有限的条件下的 PPP 时间传递试验。依旧在静态模式下，使用 CNES 实时产品中 GPS+BDS、GPS+GLONASS 和 GPS+Galileo 不同星座之间组合进行 PPP 解算，截止高度角分别为 20° 和 30° ，进行所有链路结果的平均 STD 值统计以及相对使用 GPS 单系统实时产品链路结果改善情况统计。从表 5 可以发现，截止高度角为 10° 、 20° 、 30° 时，使用 CNES 多系统实时产品，STD 在 0.3~0.4 ns 之间。同使用 GPS 单系统实时产品相比，4 条时间链路结果 STD 减小百分比分别在 11.11%~13.89%，10.81%~16.21%，11.42%~12.82%。

表 5 所有链路平均标准偏差值统计结果

单位：ns

截止高度角	GPS	GPS+BDS	百分比/%	GPS+Galileo	百分比/%	GPS+GLONASS	百分比/%
10°	0.36	0.31	13.89	0.32	11.11	0.31	13.89
20°	0.37	0.33	10.81	0.33	10.81	0.31	16.21
30°	0.39	0.34	12.82	0.35	11.42	0.34	12.82

图 10 至图 12 分别是 BRUX-HOB2 时间链路基于 GPS+Galileo 实时产品、GPS+BDS 实时产品和 GPS+GLONASS 实时产品 PPP 解算的 MDEV。从图中可以看到，在截止高度角为 20° 时，PPP 时间传递结果的长期稳定度优于截止高度角为 10° 的结果，原因可能是在截止高度角为 20° 时，PPP 解算时受到多路径效应的影响较小。当截止高度角为 30° 时，长期稳定度较差，可能是由于可见卫星数量较少所导致的。BRUX-GMSD、BRUX-BOR1、BRUX-WTZR 3 条时间链路基于不同 GNSS 组合的实时产品 PPP 解算的 MDEV 与 BRUX-HOB2 时间链路的 MDEV 趋势相同，这里不再一一展示。

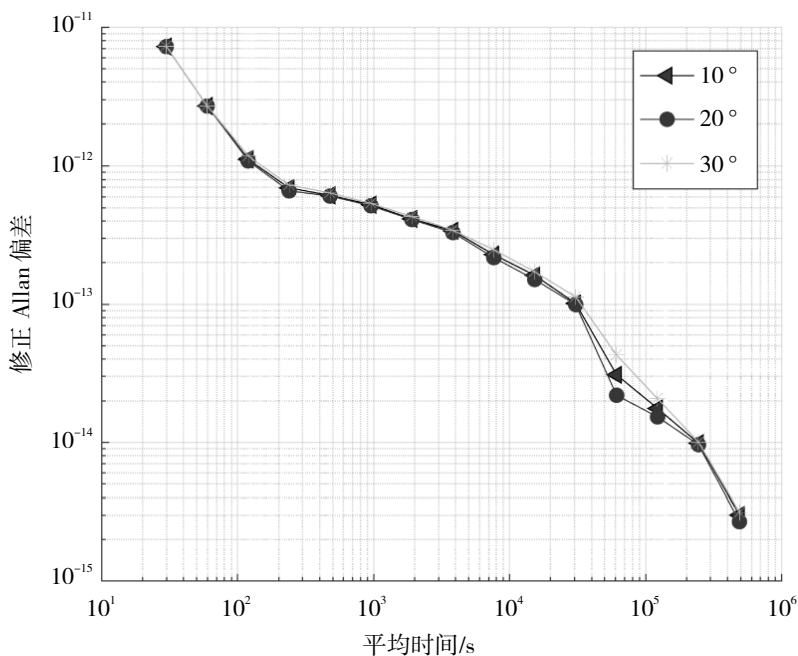


图 10 GPS+Galileo 实时产品 PPP 解算的 BRUX-HOB2 的修正 Allan 偏差

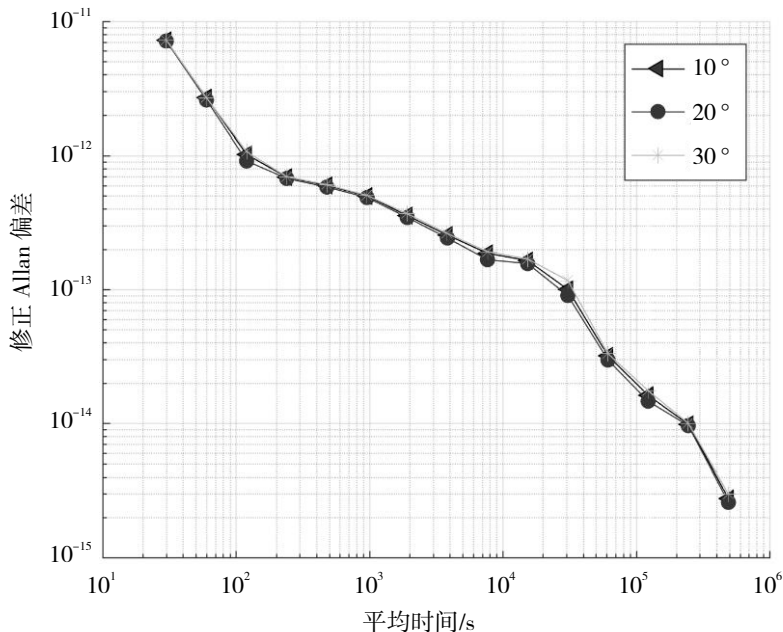


图 11 GPS+BDS 实时产品 PPP 解算的 BRUX-HOB2 的修正 Allan 偏差

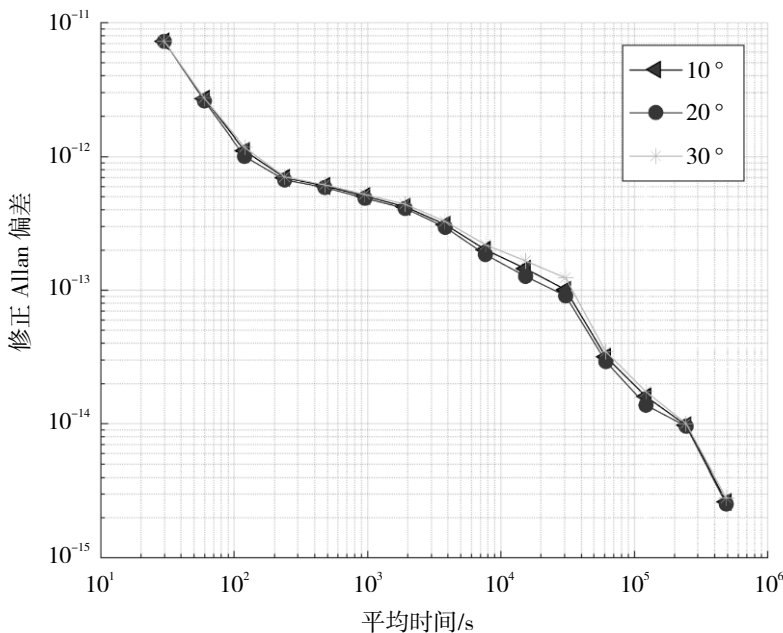


图 12 GPS+GLONASS 实时产品 PPP 解算的 BRUX-HOB2 的修正 Allan 偏差

5 结语

本文首先对法国空间研究中心提供的多系统实时轨道和钟差产品的完整性进行统计和分析,统计得到 CNES 多系统实时产品的完整率,其中 GPS 系统和 GLONASS 系统的实时产品完整率高于 90%,Galileo 系统和 BDS 系统的实时产品完整率分别为 70.66%和 84.34%。然后将 CNES 的实时轨道与钟差产品用于 PPP 时间传递,从不同 GNSS 系统组合、截止高度角的变化两个角度,设计了多种试验策略并进行 PPP 解算。结果表明,使用 CNES 实时 GPS 单系统产品,PPP 时间传递的标准偏差在 0.3~0.5 ns 之间;利用多种组合模式的多系统产品得到的 STD 相较于 GPS 单系统有所减小,在截止高度角为 10°,20°,30°时,

STD 减小的百分比分别为 11.11%~13.89%, 10.81%~16.21%, 11.42%~12.82%。

致谢: 感谢 IGS 提供的实时多系统产品和观测数据; 感谢中国科学院国家授时中心 iGMAS 分析中心、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”提供的帮助。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] GE Y L, YANG X H, QIN W J, et al. Mitigation of the multipath effect in BDS-based time transfer using a waveabsorbing shield[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 63(9): 1-2.
- [3] RAY J, SENIOR K. Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements[J]. *Metrologia*, 2005, 42(4): 215-232.
- [4] TU R, ZHANG P F, ZHANG R, et al. Approach for GPS precise time transfer using an augmentation information and zero-differenced PPP model[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(8): 801-806.
- [5] PETIT G, JIANG Z H. Precise point positioning for TAI computation[J]. *IEEE*, 2008, 562878: 1-8.
- [6] 欧阳明俊, 杨旭海, 孙保琪, 等. 基于初始运行阶段 Galileo PPP 国际时间传递[J]. *时间频率学报*, 2019, 42(2): 176-182.
- [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] IGS. International GNSS Service[EB/OL]. (2020-01-15)[2020-04-10]<http://www.igs.org/products>.
- [9] 王胜利, 王庆, 高旺, 等. IGS 实时产品质量分析及其在实时精密单点定位中的应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(S2): 365-369.
- [10] ZHANG L, YANG H Z, GAO Y, et al. Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12): 2942-2954.
- [11] 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.
- [12] HARMEGNIES A, DEFRAIGNE P, PETIT G. Combining GPS and GLONASS in all-in-view for time transfer[J]. *Metrologia*, 2013, 50(3): 277-287.
- [13] 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.