引文格式：林仁超,魏荣暖,廖翠环,等. 顾及ISB约束的多系统PPP时间传递性能评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 82-85. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.11.017

顾及ISB约束的多系统PPP时间传递性能评估

林仁超[1]，魏荣暖[2*]，廖翠环[2]，韦慕兰[2]，黄小花[2]，张永霞[2]，黄汉山[2]
（1. 广西自然资源勘测设计有限公司，广西 南宁 530000；2. 广西自然资源职业技术学院，广西 崇左 532199）

摘　要：系统间偏差（ISB）是全球导航卫星系统（GNSS）精密单点定位（PPP）的重要误差源，也是GNSS PPP时间传递重要误差之一。利用全球均匀分布的MGEX站观测数据构成13条时间链路，评估了GPS、GLONASS、Galileo、BDS单系统和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统的时间传递性能。结果表明，GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3在13条时间链路时间传递钟差差值的RMS均值分别为0.087、0.472、0.085、0.579、0.486 ns，STD均值分别为0.072、0.363、0.071、0.501、0.371 ns；GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统较上述单系统在时间传递钟差差值的RMS均值上分别提升了17.11%、84.81%、15.61%、87.60%、85.22%，在STD均值上分别提升了26.53%、85.44%、25.50%、89.47%、85.72%。当时间间隔为10^3 s量级时，单系统的时间链路MADEV值均在10^{-13} ns量级，而多系统的时间链路MADEV值则在10^{-13}~10^{-14} ns量级，说明在PPP时间传递性能上GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统比各单系统有显著提升。

关键词：GNSS；PPP；ISB；时间链路
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0082-04

Multi-system PPP Time Transfer Performance Evaluation Considering ISB Constraints

LIN Renchao[1], WEI Rongnuan[2], LIAO Cuihuan[2], WEI Mulan [2], HUANG Xiaohua[2],
ZHANG Yongxia[2], HUANG Hanshan[2]
(1. Guangxi Natural Resources Survey and Design Co., Ltd., Nanning 530000, China;
2. Guangxi Natural Resources Vocational and Technical College, Chongzuo 532199, China)

Abstract: Inter-system bias (ISB) is an important source of precision point positioning (PPP) error in global navigation satellite system (GNSS), and also one of the important errors in GNSS PPP time transfer. We used 13 time links constructed from globally uniformly distributed MGEX station observation data to evaluate the time transfer performance of GPS, GLONASS, Galileo, BDS, and GPS+GLONASS+Galileo+BDS multi-system. The experimental results show that the average RMS values of clock bias differences in the 13 time links of GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2 and BDS-3 are 0.087, 0.472, 0.085, 0.579, and 0.486 ns, respectively, and the average STD values are 0.072, 0.363, 0.071, 0.501, and 0.371 ns, respectively. Compared with GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2 and BDS-3, the GPS+GLONASS+Galileo+BDS multi-system has improved the accuracy of time transfer clock bias difference in average RMS value by 17.11%, 84.81%, 15.61%, 87.60%, and 85.22% respectively, and in average STD value by 26.53%, 85.44%, 25.50%, 89.47%, and 85.72% respectively. When the time interval is on the order of 10^3 s, the MADEV values of GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2 and BDS-3 time links are on the order of 10^{-13} ns, while GPS+GLONASS+Galileo+BDS multi-system time links are on the order of 10^{-13} ns to 10^{-14} ns, confirming that the GPS+GLONASS+Galileo+BDS multi-system has significantly improved PPP time transfer performance compared to various GNSS single systems.

Key words: GNSS, PPP, ISB, time link

随着我国北斗全球卫星导航系统（BDS）的建设完成，全球导航卫星系统（GNSS）呈现出以BDS、GPS、GLONASS和Galileo为主的多模多频并存格局[1]。由于不同导航系统间存在不可忽视的系统间偏差（ISB），因此多系统GNSS数据处理面临着前所未有的挑战[2-3]。精密时间传递是精密时间系统中的重要一环，是建立和维持高精度国家标准时间的重要保障。GNSS具有精度高、成本低、不受距离限制等

项目来源：国土空间规划中教育专项规划编制研究资助项目（2021ZJY1866）；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2024KY1633）。
第一作者简介：林仁超（1985—），本科，高级工程师，从事工程测量、不动产测绘、市政工程测量、GNSS数据处理与应用等相关工作，E-mail：763844015@qq.com。
通信作者：魏荣暖（1976—），硕士研究生，副教授，高级工程师，从事测绘地理信息、国土空间规划等相关工作，E-mail：653912628@qq.com。

特点，是目前时间传递领域的重要技术支撑[4-6]。GNSS时间传递方法主要包括共视法（CV）、全视法（AV）和精密单点定位（PPP）法[7-9]，其中CV和AV方法仅采用伪距观测值，而伪距观测噪声和多路径效应掩盖了原子钟的短期稳定性，因此引入了载波相位观测值应用于GNSS时间传递。载波相位时间传递模型与PPP模型是一致的，PPP利用外部提供的精密星历和钟差产品可提供厘米级的高精度位置服务[10-11]，但在实际应用中，不同GNSS系统之间的硬件或信号特性差异引起的偏差将会对多系统PPP性能产生直接影响。国内外学者针对该问题进行了一系列研究[12-13]，结果表明在多系统PPP时间传递过程中需要考虑ISB的影响。基于此，本文推导了顾及ISB的多系统PPP时间传递模型，并对GPS、GLONASS、Galileo和BDS不同系统间的时间传递性能进行了评估，旨在提高多系统PPP的时间传递性能。

1　顾及ISB多系统PPP时间传递模型

根据对电离层延迟的处理策略，通常将PPP函数模型分为非组合模型和无电离层组合模型。本文采用无电离层函数模型，具体数学表达式为[14]：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{IF,r}}=\rho+\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{r}}-\mathrm{cd}\,t^{\mathrm{s}}+T_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}+b_{\mathrm{IF,r}}+b_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}}+\varepsilon(P_{\mathrm{IF,r}}) \\ \Phi_{\mathrm{IF,r}}=\rho+\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{r}}-\mathrm{cd}\,t^{\mathrm{s}}+T_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}+N_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s}}+B_{\mathrm{IF,r}}+B_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s}}+\varepsilon(\Phi_{\mathrm{IF,r}}) \end{cases} \tag{1}$$

式中，IF 为双频无电离层组合的两个频率；P 为伪距观测值；Φ 为载波相位观测值；ρ 为卫星和接收机间的空间几何距离；$\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{r}}$ 为接收机偏差；$\mathrm{cd}\,t^{\mathrm{s}}$ 为卫星钟偏差；b_{r}、b^{s} 为伪距相关的接收机端和卫星端硬件延迟；B_{r}、B^{s} 为载波相位相关的接收机端和卫星端硬件延迟；N 为相位模糊度；ε 为多路径误差的测量噪声。

本文多系统采用GPS、GLONASS、Galileo、BDS（BDS-2+BDS-3）双频载波相位观测值构建IF组合消除一阶电离层延迟的影响。由于各导航卫星系统时间系统的定义不同，对应的接收机硬件延迟也不同，因此解算多系统观测数据时，引入ISB参数补充不一致性，同时考虑BDS-2与BDS-3之间的ISB。在GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统联合PPP时间传递模型中，以GPS卫星的接收机钟差为参考值，将ISB参数引入GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3的卫星观测方程中，则多系统PPP时间传递线性化的观测模型可表示为[15-16]：

$$\begin{cases} p_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,G}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,G}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,G}}\times Z_{r} \\ l_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,G}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,G}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,G}}\times Z_{r}+\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,G}} \\ p_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,R}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,R}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,R}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,R}}\times Z_{\mathrm{r}} \\ l_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,R}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,R}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,R}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,R}}\times Z_{\mathrm{r}}+\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,R}} \\ p_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,E}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,E}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,E}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,E}}\times Z_{\mathrm{r}} \\ l_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,E}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,E}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,E}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,E}}\times Z_{r}+\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,E}} \\ p_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C2}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C2}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,C2}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C2}}\times Z_{\mathrm{r}} \\ l_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C2}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C2}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,C2}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C2}}\times Z_{\mathrm{r}}+\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C2}} \\ p_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C3}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C3}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,C3}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C3}}\times Z_{\mathrm{r}} \\ l_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C3}}=\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C3}}\times x+\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,C3}}+m_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s,C3}}\times Z_{\mathrm{r}}+\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C3}} \end{cases} \tag{2}$$

式中，G、R、E、C2和C3分别为GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2和BDS-3；p、l 为双频无电离层组合模式下伪距和相位的OMC；$\boldsymbol{\mu}$ 为视线方向的单位向量；x 为接收机三维坐标；$\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}$ 为吸收了GPS接收机端伪距硬件延迟的接收机钟差估值；$\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G},*}$ 为GPS与其他系统间的ISB；$\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s},*}$ 为吸收了各种硬件延迟而失去整数特性的相位模糊度；m 为对流层的湿映射函数；Z 为对流层天顶湿延迟。

为提高PPP的时间传递性能，将IGS SINEX周解文件中提供的接收机坐标 x_{SNX} 作为先验约束引入观测模型中，待估参数包括接收机的三维坐标、接收机钟差、ISB、对流层ZWD和相位模糊度，估值向量的数学表达式为：

$$\begin{aligned} O=[&x,\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}},\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,R}},\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,E}},\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,C2}},\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,C3}},Z_{r}, \\ &\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,R}},\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,E}},\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C2}},\bar{N}_{\mathrm{IF,r}}^{\mathrm{s,C3}}] \end{aligned} \tag{3}$$

ISB估值中卫星钟基准间的偏差可表示为[16]：

$$\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,Q}}=\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{Q}}-\mathrm{cd}\,\bar{t}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G}}+b_{\mathrm{r,IF}}^{\mathrm{Q}}-b_{\mathrm{r,IF}}^{\mathrm{G}}+dD^{AC,\mathrm{Q}}-dD^{AC,\mathrm{G}} \tag{4}$$

式中，dD^{AC} 为精密钟差估计中不同分析中心引入的卫星钟差基准；Q为在具体方程中对应的系统。

由于在观测文件和精密钟差产品中各卫星系统的时间尺度都已被归算到GPST上，时间尺度对ISB的影响非常小，同一台接收机在一段时间内的硬件延迟偏差是稳定的，因此认为相邻两天卫星时钟基准不同导致了相邻的ISB估值发生阶跃[13,16]。计算得到相邻两天不同卫星的时钟基准之差，就能恢复得到稳定的ISB估值序列，以校正ISB的“日界不连续”现象。本文以这种稳定的ISB估值为先验知识进行约束，提出了一种顾及ISB约束的PPP时间传递模型。

利用前一天精密卫星钟差产品中23:58:30、23:59:00、23:59:30对应的GPS卫星钟差值，通过二阶多项式拟合即可预测这一天00:00:00对应的GPS理论卫星钟差

值。实际上，该卫星钟差值与预测值通常存在一定的差值，且这种差值对于系统内的所有卫星基本是一致的。因此，相邻两天卫星钟基准之差的表达式为[17-18]：

$$dD_{\mathrm{d}}^{AC,\mathrm{Q}}=dD_{\mathrm{t}}^{AC,\mathrm{Q}}-dD_{\mathrm{p}}^{AC,\mathrm{Q}}=\frac{\sum_{s=1}^{n}\left(\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{IF,e}}^{\mathrm{s,Q}}-\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{IF,p}}^{\mathrm{s,Q}}\right)}{n} \tag{5}$$

式中，$dD_{\mathrm{t}}^{AC,\mathrm{Q}}$、$dD_{\mathrm{p}}^{AC,\mathrm{Q}}$为当天、前一天的卫星钟基准；$\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{IF,e}}^{\mathrm{s,Q}}$为精密卫星钟差文件中提供的当天卫星钟差值；$\mathrm{cd}\,t_{\mathrm{IF,p}}^{\mathrm{s,Q}}$为预测得到的当天卫星钟差值；$n$为卫星数量。

在多系统组合PPP时间传递的观测方法中，将相邻两天的卫星钟基准之差加入伪观测方程，实现先验ISB约束，数学表达式为：

$$\mathrm{ISB}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{G,Q}}=\mathrm{ISB}_{\mathrm{r,p}}^{\mathrm{G,Q}}+dD_{\mathrm{d}}^{AC,\mathrm{Q}}-dD_{\mathrm{d}}^{AC,\mathrm{G}} \tag{6}$$

式中，$\mathrm{ISB}_{\mathrm{r,p}}^{\mathrm{G,Q}}$为前一天完全收敛后的ISB平均估计值。

时间链路是指传递时间信息的链路，其观测模型与PPP时间传递观测模型一致。由于构成的时间链路两端存在不同时间、频率参考，因此本文采用MADEV计算时间传递结果的频率稳定性，以判断不同系统PPP时间传递的稳定性。在实际使用过程中，为适应数据特征，往往需对MADEV进行修正，数学表达式为[19]：

$$\sigma_y^2(\tau)=\frac{1}{2\left(N^{'}-2\right)\tau^2}\sum_{i=1}^{N-2}\left[x_{i+2m}-2x_{i+m}+x_i\right]^2 \tag{7}$$

$$N^{'}=\mathrm{int}\left(N/m\right)+1 \tag{8}$$

式中，N为采样数量；$N^{'}$为测量间隔为τ的相位数据数量；τ为采样间隔。

2 数据来源与处理策略

为评估GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统PPP的时间传递性能，本文选取MGEX网在全球均匀分布的14个观测站2023年年积日001~031共31d观测数据，以CEBR站为中心节点与其他测站构成13条时间链路，站点详细信息见表1。

表1 MGEX站点详细信息

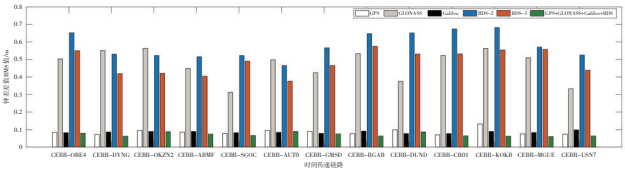
测站名称	接收机型号	天线类型	测站钟型号	纬度/(°)	经度/(°)
CEBR	SEPT POLARX5TR	SEPCHOKE_B3E6	H-MASER	40.453	-4.368
OBE4	JAVAD TRE_3 DELTA	ASH701945C_M	H-MASER	48.051	11.164
DYNG	JAVAD TRE_3 DELTA	JAVRINGANT_DM	H-MASER	38.044	23.556
KZN2	SEPT POLARX5TR	TPSCR.G3	H-MASER	55.473	49.071
ABMF	SEPT POLARX5TR	ASH701945G_M	H-MASER	16.315	61.314
SGOC	JAVAD TRE_3 DELTA	SEPCHOKE_B3E6	H-MASER	65.331	79.523
AUT0	POLARX4TRSEPT	LEIAR25.R4	H-MASER	30.234	97.441
GMSD	POLARX4TRSEPT	TRM59800.00	H-MASER	30.332	131.006
GRAB	SEPT POLARX5TR	TPSCR.G5	H-MASER	47.060	152.940
DUND	POLARX4TRSEPT	LEIAR25.R4	H-MASER	45.530	170.355
CR01	JAVAD TRE_3 DELTA	JAVRINGANT_DM	H-MASER	17.757	-64.584
KOKB	SEPT POLARX5TR	ASH701945G_M	H-MASER	22.126	-159.665
MGUE	SEPT POLARX5TR	LEIAR25.R4	H-MASER	-35.777	-69.398
USN7	SEPT POLARX5TR	LEIAR25.R4	H-MASER	38.921	-77.398

本文分别采用GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2/BDS-3单系统和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统开展PPP时间传递性能评估实验，截止高度角设置为15°，采样间隔均为30 s，精密星历和精密钟差均采用GBM产品文件，DCB改正采用CODE中心发布的DCB产品文件，以对流层延迟作为参数、以接收机钟差作为白噪声进行估计，天线相位中心采用igs14.atx产品进行改正，模糊度采用估计模糊度浮点解处理，ISB采用随机游走进行估计。

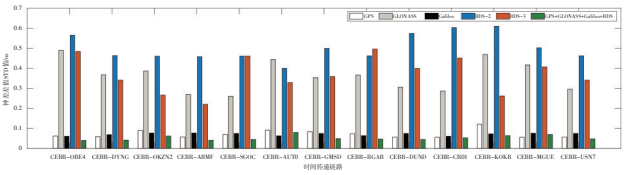
3 案例分析

本文对2023年年积日001~031共31 d观测数据分别进行GPS、GLONASS、Galileo、BDS单系统PPP和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统PPP的时间传递，以测站、链路钟差差值为PPP时间性能传递的精度因子，数据分析过程中仅处理完全收敛后的钟差差值，同时剔除时间基准的影响。GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2/BDS-3单系统和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统的各时间链路钟差差值的RMS值、STD值可视化结果见图1，可以看出，GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3的13条时间链路时间传递钟差差值RMS均值分别为0.087、0.472、0.085、0.579、0.486 ns，STD均值分别为0.072、0.363、0.071、0.501、0.371 ns；GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统的13条时间链路时间传递钟差差值RMS均值、STD均值分别为0.072、0.053 ns，与GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统相比，GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统在RMS均值方面精度分别提升了17.11%、84.81%、15.61%、87.60%、85.22%，在STD均值方面精度分别提升了26.53%、85.44%、25.50%、89.47%、85.72%。结果表明，GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统的时间链路钟差差值优于单系统，其中对GLONASS、BDS-2、

BDS-3时间链路传递钟差效果的提升更显著。



a RMS值



b STD值

图1　PPP时间传递钟差差值RMS和STD值可视化结果

GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统PPP和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统PPP时间链路相邻两天之间在时间间隔10^3 s量级时MADEV的可视化结果见图2，可以看出，GLONASS单系统时间链路MADEV值差异最明显，BDS单系统次之，可能是由不同经纬度区域测站可见卫星数量、信号质量存在差异导致的，该现象与参考文献[16]结果相吻合；GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统PPP时间传递频率稳定性分别可达1.48×10^{-13}、6.25×10^{-13}、2.20×10^{-13}、3.94×10^{-13}、3.47×10^{-13} ns；GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统时间传递结果相较于GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3的平均改善率分别为18.08%、80.60%、44.98%、69.24%、65.05%。总体而言，GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统时间链路MADEV值差异较小，即时间传递稳定性最佳；当时间间隔为10^3 s量级时，GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3的时间链路MADEV值在10^{-13} ns量级，而GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统则在10^{-13}~10^{-14} ns量级，进一步证实了相较于各单系统多系统在PPP时间传递性能上具有显著提升。

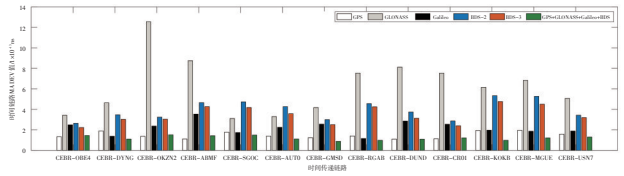


图2　ISB约束的PPP时间链路平均MADEV可视化结果

为进一步对比分析顾及ISB约束对多系统PPP时间传递的影响，设置对照实验，将顾及ISB约束和未顾及ISB约束作为实验唯一控制变量，此时对同一时间链路而言，链路两端接收机天线硬件完全一致，不会对实验结果产生影响。GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统PPP和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统PPP时间链路相邻两天之间在时间间隔10^3 s量级时的MADEV值见表2，可以看出，在未顾及ISB约束的情况下，GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统PPP时间传递频率稳定性MADEV值分别为1.69×10^{-13}、7.14×10^{-13}、2.46×10^{-13}、4.45×10^{-13}、3.91×10^{-13}、1.35×10^{-13} ns；而对于同一观测系统同一时间链路而言，顾及ISB约束的PPP时间链路平均MADEV值明显更小，PPP时间传递性能更佳，进一步证实了顾及ISB约束的PPP算法可有效提升PPP时间传递性能。

表2　无ISB约束的PPP时间链路平均MADEV统计结果/1×10^{-13} ns

时间传递链路	GPS	GLONASS	Galileo	BDS-2	BDS-3	GPS+GLONASS+Galileo+BDS
CEBR-OBE4	1.57	3.84	2.89	2.79	2.56	1.73
CEBR-DYNG	2.25	5.43	1.53	3.88	3.26	1.25
CEBR-KZN2	1.46	13.44	2.73	3.59	3.25	1.63
CEBR-ABMF	1.32	9.74	3.81	5.43	4.80	1.54
CEBR-SGOC	2.04	3.69	2.01	5.53	4.99	1.62
CEBR-AUT0	1.48	3.86	2.37	4.60	3.94	1.30
CEBR-GMSD	1.36	4.99	2.79	3.37	2.86	0.96
CEBR-GRAB	1.59	8.66	1.23	5.09	4.60	1.15
CEBR-DUND	1.31	8.57	3.04	4.29	3.64	1.18
CEBR-CR01	1.35	8.87	2.99	3.32	2.61	1.45
CEBR-KOKB	2.09	8.00	2.28	6.21	5.35	1.08
CEBR-MGUE	2.34	7.87	2.05	5.75	5.20	1.32
CEBR-USN7	1.88	5.90	2.26	3.95	3.79	1.41

4　结　语

本文借助MGEX网2023年年积日001~031共31 d观测数据对GPS、GLONASS、Galileo、BDS单系统和GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统时间传递性能进行了评估，得到以下结论：

1）GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统时间链路钟差差值优于单系统，且多系统较GLONASS、BDS单系统的效果提升更显著。

2）与单系统相比，GPS+GLONASS+Galileo+BDS多系统时间链路MADEV值差异更小，时间传递稳定性更好。

3）GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统时间链路时间传递钟差差值的RMS均值分别为0.087、0.472、0.085、0.579、0.486 ns，STD均值分别为0.072、0.363、0.071、0.501、0.371 ns。

4）GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3单系统PPP时间传递频率稳定性分别可达1.48×10^{-13}、

（下转第94页）