

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.008

顾及 BDS-2/BDS-3 间 ISB 的精密定位及时频传递性能评估

堵晨曦¹, 王旭东¹, 谷玉宝¹, 廖振修²

(1. 国网安徽省电力有限公司建设分公司, 安徽 合肥 230071; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)-3 已于 2020 年 7 月 31 日正式向全球用户提供定位、导航和授时服务, 因 BDS-2 与 BDS-3 在信号调制方式及特性上存在差异, 接收机端在接收与处理 BDS-2、BDS-3 信号时将存在系统间偏差(inter-system bias, ISB)。文章采取忽略 ISB(ISB_{NO})、ISB 估计为常数(ISB_{CT})、ISB 估计为随机游走(ISB_{RW})、ISB 估计为白噪声(ISB_{WN}) 4 种随机模型, 分别使用 GBM、WUM、CLK93 实时精密产品, 基于 BRUX、CEDU、CUT0、HOB2、HARB、PTBB 站点的观测数据, 对 BDS-2/BDS-3 组合事后、仿实时精密单点定位(precise point positioning, PPP)及时频传递性能进行评估。结果表明: GBM、WUM 产品事后平均 PPP 定位精度、收敛时间均在 1.7 cm、23.3 min, 估计 ISB 策略的定位及时频传递性能均稍优于忽略 ISB 策略, ISB_{CT} 的数据处理策略最优。CLK93 产品仿实时 PPP 的三维定位精度优于 4.0 cm, 估计 ISB 与忽略 ISB 的定位精度相当、收敛时间有所缩短、时频传递稳定度有所提升, ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 相比 ISB_{NO} 解算策略在 60 000 s 的平均频率稳定度分别提高了 8.03%、25.32%、24.21%。综合比较, BDS-2/BDS-3 组合 PPP 的 ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 策略定位及时频传递性能优于 ISB_{NO} 、 ISB_{WN} 策略。

关键词:北斗卫星导航系统(BDS); 系统间偏差(ISB); 精密单点定位(PPP); 定位; 时频传递
中图分类号: P288.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)09-1202-11

Performance evaluation of precise positioning and time-frequency transfer considering ISB between BDS-2 and BDS-3

DU Chenxi¹, WANG Xudong¹, GU Yubao¹, LIAO Zhenxiu²

(1. Construction Company of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230071, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: BeiDou Navigation Satellite System(BDS)-3 has officially provided positioning, navigation and timing services to global users on July 31, 2020. Due to the differences in signal modulation modes and characteristics between BDS-2 and BDS-3, there will be inter-system bias(ISB) when the receiver receives and processes BDS-2 and BDS-3 signals. This paper adopts four random models: ignoring ISB(ISB_{NO}), ISB estimation as constant(ISB_{CT}), ISB estimation as random walk(ISB_{RW}) and ISB estimation as white noise(ISB_{WN}). GBM, WUM and CLK93 real-time precision products are used respectively. Based on the observation data of BRUX, CEDU, CUT0, HOB2, HARB and PTBB, the performance of mimic real-time and post precise point positioning(PPP) and time-frequency transfer of BDS-2/BDS-3 combination was evaluated. The results show that the average PPP positioning accuracy and convergence time of GBM and WUM products are both 1.7 cm and 23.3 min. The positioning and time-frequency transfer performance of the ISB estimation strategy is slightly better than that of the ignoring ISB strategy, and the data processing strategy of ISB_{CT} is the best. The 3D positioning accu-

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41906168)

作者简介: 堵晨曦(1989—), 男, 安徽合肥人, 国网安徽省电力有限公司建设分公司工程师。

racy of mimic real-time PPP of CLK93 product is better than 4.0 cm, the positioning accuracy of ISB estimation is equivalent to that of ignoring ISB, the convergence time is shortened, and the stability of time-frequency transfer is improved. The average frequency stability of ISB_{CT} , ISB_{RW} and ISB_{WN} is 8.03%, 25.32% and 24.21% higher than that of ISB_{NO} solution strategy in 60 000 s, respectively. By comprehensive comparison, ISB_{CT} and ISB_{RW} strategies with BDS-2/BDS-3 combined PPP have better positioning and time-frequency transfer performance than ISB_{NO} and ISB_{WN} strategies.

Key words: BeiDou Navigation Satellite System(BDS); inter-system bias(ISB); precise point positioning(PPP); positioning; time-frequency transfer

北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)作为继美国全球定位系统(Global Positioning System,GPS)、俄罗斯全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)之后的全球第三大导航定位系统,其发展和建设经历了实验系统 BDS-1、区域系统 BDS-2 和全球系统 BDS-3 阶段。BDS-2 包含 5 颗地球静止轨道(geostationary earth orbit,GEO)、7 颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit,IGSO)和 3 颗中轨道地球(medium earth orbit,MEO)卫星,可发射 B1I(1 561.098 MHz)、B2I(1 207.14 MHz)和 B3I(1 268.52 MHz)信号。BDS-3 由 3 颗 GEO、24 颗 MEO 和 3 颗 IGSO 卫星组成,可发射新信号 B1C(1 575.42 MHz)、B2a(1 176.45 MHz)和 B2b(1 207.14 MHz),并兼容 B1I 和 B3I 信号,已于 2020 年 7 月 31 日正式开始为全球提供 PNT 服务^[1-3]。

近年来,相关学者对 BDS-3 及 BDS-2/BDS-3 组合在定位、授时、定轨、电离层建模、对流层估计、5G+融合^[4]等方面进行了大量研究。文献[5-6]证明 BDS-2/BDS-3 组合相比 BDS-2 静态精密单点定位(precise point positioning,PPP)在 E、N、U 方向精度分别提高了 17.05%、24.42%、35.65%,收敛时间分别缩短了 27.15%、27.87%、35.76%;文献[7]研究表明 BDS-2 与 BDS-3 组合的 PPP 模糊度固定率有显著的提升;文献[8]利用全球 16 个 BDS-3 地面站,结合 Ka 波段卫星间链路观测,三维轨道重叠的均方根改善率约为 42%;文献[9]使用分布在全球的 154 个站点 30 d 观测数据,对 BDS-2/BDS-3 非组合 PPP 的可用性 & 定位精度进行评估,表明 BDS-2/BDS-3 组合相比 BDS-2 的定位精度和收敛时间均提高了约 50%以上;文献[10]综合分析 BDS-3 精密产品的质量,分别使用 GBM、WUM、IAC、SHA 和 CNT 轨道与钟差产品对 24 个 BDS 测站的定位性能进行评估;文献[11]利用 SSRA00CNE0 实时(real-

time,RT)产品,从时间传递、定位和对流层延迟反演等方面对 BDS-3 实时 PPP 进行研究,表明 BDS-3 与 GPS 实时 PPP 的性能相当;文献[12]从卫星星历、BDS-3 卫星的优势和新信号对单点定位(single point positioning,SPP)、PPP 和实时动态载波差分定位(real time kinematic,RTK)3 种模式的影响等角度,对 BDS-3 的全球服务性能进行研究;文献[13]研究 BDS-3 四频信号超宽巷/宽巷组合的实时动态 RTK 性能;文献[14]进行 BDS-2/BDS-3 三频 PPP 时频传递实验,表明 BDS 在 10 000 的频率稳定度可达到 1.5×10^{-14} ;文献[15]对 BDS-3 四频 PPP 定位性能、时频传递稳定度、对流层天顶延迟、频率间偏差(inter-frequency bias,IFB)和差分码偏差(different code bias,DCB)等进行了评估。

为兼容 BDS-3 新信号,部分接收机厂家在原 BDS-2 接收机的基础上,增加了 BDS-3 信号接收与处理模块,即 BDS-2 与 BDS-3 信号由不同的单元进行接收与处理。此外,BDS-2 和 BDS-3 是两代导航系统,BDS-2 和 BDS-3 的信号调制模式和信号特性不尽相同。这些都可能导致 BDS-2 与 BDS-3 间可能存在 ISB。文献[16]对 BDS-2/BDS-3 组合定位 ISB 估计方式对时频传递的影响进行分析,得出了将 ISB 估计为常数或随机游走优于估计为白噪声的结论;文献[17]分别采用 GBM 与 WUM 精密产品研究 BDS-2 与 BDS-3 间 ISB 的特性并讨论 ISB 参数估计对精密定位的影响,表明在一天内的 ISB 可以被视为常数,估计 ISB 参数可以提高动态 PPP 的性能;文献[18]对 BDS-2 与 BDS-3 间存在的码偏差进行研究,表明改正码偏差后的 PPP 在收敛时水平方向和垂直方向的定位精度分别提高了约 38%和 21%,在收敛后准确率提高约 10%;文献[6]研究 BDS-2、BDS-3 间系统间偏差(inter-system bias,ISB)对时频传递的影响;文献[19]分析 BDS-2 和 BDS-3 之间的时延偏差及其对 PPP 的影响,指出连续几

天的 BDS-2 与 BDS-3 间的时间延迟偏差的每日平均值在 1 ns 内,没有明显的日边界不连续性。

为进一步探索 BDS-2 与 BDS-3 间的 ISB 对精密定位及授时性能的影响,拟选用武汉大学 WUM、德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)GBM 事后精密产品及法国空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)提供的 CLK93 (SSRA00CNE0) 实时产品,分别以忽略 ISB (ISB_{NO})、ISB 估计为常数 (ISB_{CT})、ISB 估计为随机游走 (ISB_{RW}) 和 ISB 估计为白噪声 (ISB_{WN}) 的 4 种随机模型进行 BDS-2/BDS-3 组合事后及仿实时 PPP 实验,给出不同 ISB 估计策略对 BDS-2/BDS-3 组合定位及时频传递的影响,为 BDS-2/BDS-3 组合 PPP 解算提供部分参考。

1 数学模型

1.1 BDS-2/BDS-3 组合 PPP 模型

GNSS 双频无电离层组合伪距与载波相位的观测方程^[20]可表示为:

$$\begin{cases} P_{r,IF}^{S,i} = \rho_r^{S,i} + ct_r^S - ct^{S,i} + F_r^{S,i} D_{ZW,r} + d_{r,IF}^{S,i} + d_{IF}^{S,i} - \zeta_{IF}^{S,i}, \\ L_{r,IF}^{S,i} = \rho_r^{S,i} + ct_r^S - ct^{S,i} + F_r^{S,i} D_{ZW,r} + \lambda_{IF}^{S,i} (N_{IF}^{S,i} + b_{r,IF}^{S,i} - b_{IF}^{S,i}) + \xi_{IF}^{S,i} \end{cases} \quad (1)$$

其中: P 和 L 分别为伪距和载波相位观测值;上标 S 和 i 分别表示 S 系统的 i 颗卫星;下标 r 和 IF 分别表示接收机和无电离层组合; λ 为无电离层组合观测值对应的波长; ρ 为卫地距; c 为光速; t_r 与 t_s 分别为接收机钟差和卫星钟差; F 为湿映射函数; D_{ZW} 为天顶对流层湿延迟; N 为整周模糊度; d 与 b 分别为未校正的伪距延迟 (uncalibrated code delay, UCD) 和未校正的相位延迟 (uncalibrated phase delay, UPD); ζ 和 ξ 分别表示伪距和载波相位的观测噪声。相对论效应、天线相位缠绕,相位中心偏差 (phase center offset, PCO)、相位中心变化 (phase center variation, PCV)、Sagnac 效应、潮汐效应等误差均已由修正模型提前校正。 $d_{r,IF}^{S,i}$ 与 $d_{IF}^{S,i}$ 可分别表示为:

$$\begin{cases} d_{r,IF}^{S,i} = \frac{f_1^2 d_{r,1}^{S,i}}{(f_1^2 - f_2^2)} - \frac{f_2^2 d_{r,2}^{S,i}}{(f_1^2 - f_2^2)}, \\ d_{IF}^{S,i} = \frac{f_1^2 d_r^{S,i}}{(f_1^2 - f_2^2)} - \frac{f_2^2 d_2^{S,i}}{(f_1^2 - f_2^2)} \end{cases} \quad (2)$$

无电离层组合的伪距离硬件延迟将会被接收机钟差吸收。考虑到 BDS-2 卫星只能覆盖亚太

及周边地区,本研究以 BDS-3 接收机钟差为基准,在 BDS-2 的观测方程中引入 ISB 参数。WUM 和 GBM 的 BDS-2、BDS-3 精密钟差产品均由 B1I/B3I 无电离层组合估计得到,因此本文也选取 B1I/B3I 信号进行数据处理。在使用精密产品及 DCB 产品改正后,线性化后的 BDS-2/BDS-3 组合 PPP 模型可以表示为:

$$\begin{cases} p_{r,IF}^{C_3,i} = \mathbf{g}_r^{C_3,i} \mathbf{x} + \tilde{a}_r + F_r^{C_3,i} D_{ZW,r} + \zeta_{IF}^{C_2,i}, \\ l_{r,IF}^{C_3,i} = \mathbf{g}_r^{C_3,i} \mathbf{x} + \tilde{a}_r + F_r^{C_3,i} D_{ZW,r} + \lambda_{IF}^{C_3,i} \tilde{N}_{IF}^{C_3,i} + \xi_{IF}^{C_3,i}, \\ p_{r,IF}^{C_2,i} = \mathbf{g}_r^{C_2,i} \mathbf{x} + ct_r + F_r^{C_2,i} D_{ZW,r} + B_{IS} + \zeta_{IF}^{C_2,i}, \\ l_{r,IF}^{C_2,i} = \mathbf{g}_r^{C_2,i} \mathbf{x} + \tilde{a}_r + F_r^{C_2,i} D_{ZW,r} + B_{IS} + \lambda_{IF}^{C_2,i} \tilde{N}_{IF}^{C_2,i} + \xi_{IF}^{C_2,i} \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} ct_r = ct_r + d_{r,IF}^{C_3}, \\ B_{IS,r} = (d_{r,IF}^{C_3} + D^{C_3}) - (d_{r,IF}^{C_2} + D^{C_2}), \\ \lambda_{IF} \tilde{N}_{IF}^{C_2,i} = \lambda_{IF} (\tilde{N}_{r,IF}^{C_2,i} + b_{r,IF}^{C_2} - b_{IF}^{C_2,i}) - d_{r,IF}^{C_2} - d_{IF}^{C_2,i}, \\ \lambda_{IF} \tilde{N}_{IF}^{C_3,i} = \lambda_{IF} (\tilde{N}_{r,IF}^{C_3,i} + b_{r,IF}^{C_3} - b_{IF}^{C_3,i}) - d_{r,IF}^{C_3} - d_{IF}^{C_3,i} \end{cases} \quad (4)$$

其中: p 和 l 分别为伪距和相位观测值减去计算值 (observed minus computed, OMC); \mathbf{g} 为接收机至卫星的单位向量; \mathbf{x} 为接收机坐标增量向量; t 为时钟差; \tilde{N} 为重新参数化后的模糊度; D 为卫星钟差基准。

1.2 ISB 参数估计随机模型

为了评估 BDS-2/BDS-3 间的 ISB 对定位及时间传递性能的影响,采取 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 4 种 ISB 参数处理策略,分别表示为:

$$I(k) = 0 \quad (5)$$

$$I(k) = I(k-1) \quad (6)$$

$$\begin{cases} I(k) = I(k-1) + \omega_{ISB}, \\ \omega_{ISB} \sim N(0, \delta_{ISB}^2) \end{cases} \quad (7)$$

$$I(k) \sim N(0, \delta^2) \quad (8)$$

其中: k 为历元; δ_{ISB}^2 和 δ^2 分别为先验随机游走噪声和白噪声。

若 BDS-2/BDS-3 间的 ISB 不存在,则 ISB 的随机模型可以用式(5)来表示,估计的参数包括接收机位置、接收机钟差、 D_{ZW} 及浮点模糊度;若 BDS-2/BDS-3 间的 ISB 长期稳定,则 ISB 的随机模型可以用式(6)表示;若 ISB 参数被认为是随时间变化的,则 ISB 可以估计为随机游走过程,用

式(7)来表示;若 ISB 参数被认为是时间无关的,并且在不同的历元之间相互独立,则可使用式(8)来表示。此时,估计的参数包括接收机位置、接收机钟差、ISB、 D_{zw} 及浮点模糊度。

2 实验及数据验证

2.1 实验数据及处理策略

为评估不同 ISB 随机模型对 BDS-2/BDS-3

组合 PPP 定位及时频传递性能的影响。选取 IGS 多 GNSS 实验 (multi-GNSS experiment, MGEX) 网 BRUX、CEDU、CUT0、HOB2、HARB、PTBB 站点 2020 年 7 月 8 日—2020 年 7 月 10 日共 3 d 的观测数据,采样间隔为 30 s。BRUX、HARB、PTBB 站外接氢原子钟, HOB2 站点外接铯原子钟,可进行时频传递实验。所选测站的基本信息见表 1 所列。

表 1 MGEX 网所选测站的信息

测站	接收机类型	天线类型	钟类型
BRUX	SEPT POLARX5TR	JAVRINGANT_DM	H-MASER
CEDU	SEPT POLARX5	AOAD/M_T	INTERNAL
CUT0	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	INTERNAL
HARB	SEPT POLARX5TR	TRM59800.00	CESIUM
HOB2	SEPT POLARX5	AOAD/M_T	H-MASER
PTBB	SEPT POLARX5TR	LEIAR25. R4	H-MASER

BDS-2 与 BDS-3 载波相位噪声均设为 3.0 mm, 伪距噪声均设为 0.6 m,按高度角正弦函数定权, GEO 观测值的权比降低 10 倍, BDS-2 MEO 与 IGSO 卫星端伪距偏差使用 Wanninger 提出的高度角模型修正^[21], BDS-2 与 BDS-3 等权处理,具体的数据处理策略见表 2 所列。将解算的坐标与国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 提供的 SNX 坐标进行比对来进行定位精度评估,采用修正的 Allan 偏差(modified Allan deviations, MADEV)来评定时频传递的稳定度。

表 2 PPP 数据处理策略

项目类型	解算策略
观测值类型	BDS-2/BDS-3: B1I、B3I
截止高度角/(°)	7
轨道与钟差	GBM/WUM/CLK93 产品
DCB	CAS BSX 产品 ^[22]
Sagnac 效应	模型改正 ^[23]
相对论效应	模型改正 ^[24]
天线相位缠绕	PhWU 模型改正 ^[25]
潮汐效应	模型改正 ^[23]
PCO/PCV	IGS14.atx
测站坐标	估计为常数
接收机钟差	估计为白噪声
ISB	忽略、常数、白噪声、随机游走估计
电离层延迟	IF 组合消除一阶电离层延迟
对流层延迟	干延迟: GPT+Saastamoinen 模型改正 ^[26] 湿延迟: 随机游走估计, GMF 投影函数 ^[27]
整周模糊度	浮点解, 估计为常数

2.2 BDS-2/BDS-3 事后 PPP 实验分析

BDS-2/BDS-3 组合的卫星数分布与精度系

数(dilution of precision, DOP)值如图 1 所示。

所选测站的 BDS 观测卫星数集中在 10~17 颗之间, DOP 均值处于 1.5 左右,说明 BDS 的可视卫星数、DOP 值与 GPS 系统水平相当,部分时段甚至优于 GPS。CEDU、CUT0、HOB2 地处澳大利亚, BDS-2 与 BDS-3 星座的覆盖效果较好,相应的 DOP 均值与卫星可见度明显优于其他测站。BRUX 与 PTBB 地处欧洲,接收到 BDS-2 的信号相对有限,覆盖到的也大多是 BDS-3 MEO 卫星,导致可见卫星数不多, DOP 均值也偏大。

HB02 站 BDS C06、C12、C24、C25 卫星多路径噪声序列如图 2 所示。由图 2 可知, B1I 频点的多路径噪声较大, B2I 频点的多路径噪声小于明显其他频点。BDS-2 存在与高度角强相关的卫星端伪距偏差,而 BDS-3 中则已不存在。经统计, BDS-2 B1I、B2I、B3I 伪距多路径噪声的均方根 (root mean square, RMS) 值分别为 0.592、0.358、0.401 m, BDS-3 中 B1I、B3I 的多路径噪声 RMS 值分别为 0.596、0.397 m。

BDS-2/BDS-3 组合 ISB_{RW}估计策略下的 PPP 收敛情况如图 3 所示。

各测站收敛后 E、N、U 方向的 RMS 分别优于 1.0、1.0、2.0 cm。其中, CUT0 站的收敛时间较长, HARB 在收敛的过程中出现了部分跳变。经统计, BRUX、CEDU、CUT0、HOB2、HARB 及 PTBB 站点完全收敛后 (E、N 方向小于 10.0 cm, U 方向小于 15.0 cm, 并从当前历元开始连续保持 20 个历元), E 方向的 RMS 值分别为 0.69、

0.72、0.71、1.31、0.87、0.58 cm, N 方向的 RMS 值分别为 0.51、0.83、0.54、0.64、0.54、0.78 cm, U 方向的 RMS 值分别为 2.02、1.93、2.08、1.19、

1.17、1.34 cm, 收敛时间分别为 9.0、14.0、39.5、28.5、9.5、31.5 min。BDS-2/BDS-3 组合相比 BDS-2 定位性能的提升情况见表 3 所列。

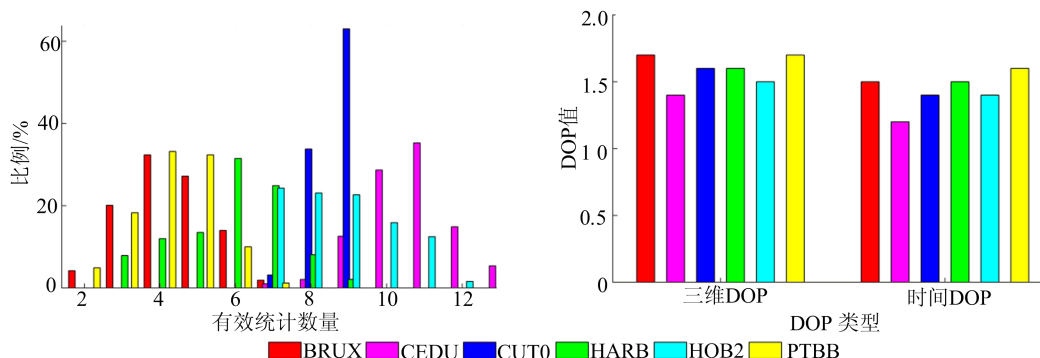


图 1 BDS-2/BDS-3 可见卫星数分布与 DOP 值

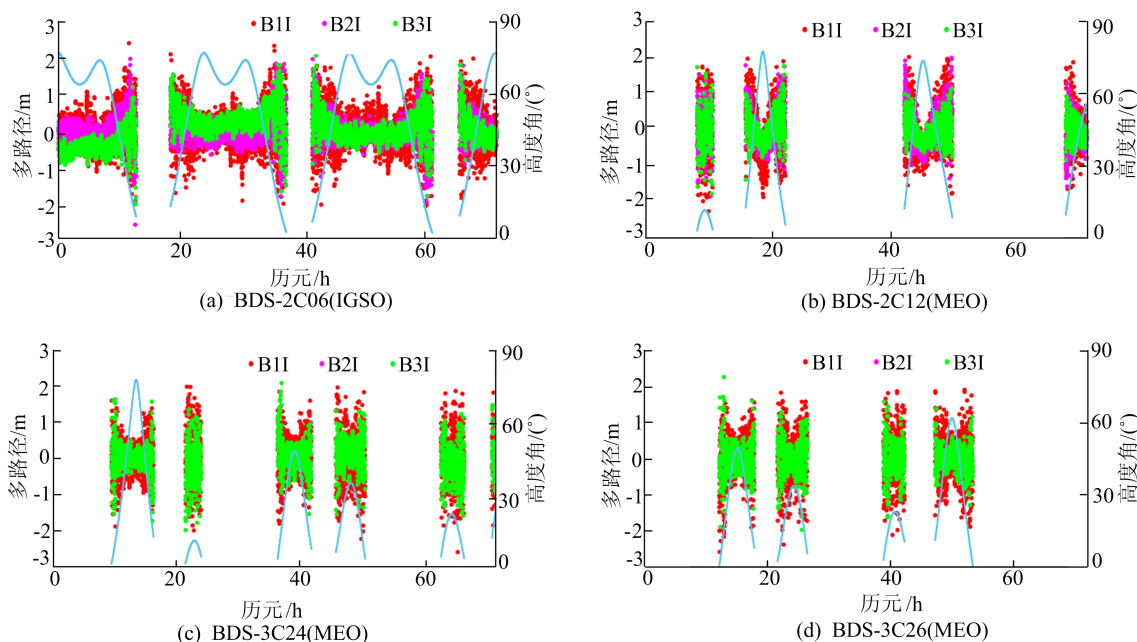


图 2 HB02 站 BDS C6、C12、C24、C25 卫星多路径噪声序列

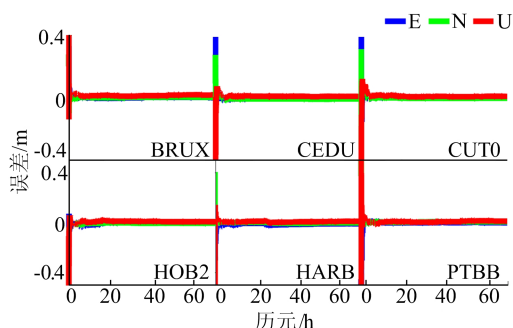


图 3 BDS-2/BDS-3 组合 ISBRW 策略 PPP 收敛曲线

由表 3 可知, BDS-2/BDS-3 组合相比单 BDS-2 的定位性能有显著提升, N 方向提升效果最为明显。所选的 5 个测站在 E、N、U 方向平均定位

精度分别提升了 41.63%、56.33%、37.10%、收敛时间缩短了 87.25%。BRUX、PTBB、HARB 站地处欧洲及南非地区, BDS-2 观测的卫星数有限, 各个方向的精度均提高了 40% 以上, 收敛时间缩短了近 90%。对原本 BDS-2 就覆盖较好的澳大利亚 CEDU、CUT0、HOB2 站点, 定位性能也有部分提升。

分别对 BDS-2/BDS-3 间的 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 4 种处理策略, 使用 GBM 与 WUM 精密产品进行实验, PPP 定位精度及收敛时间如图 4 所示。

由图 4 可知, 大部分测站不同 ISB 处理策略间定位精度的差异并不明显, 但收敛时间差异较

大。部分测站(如 HARB、HOB2)估计 ISB 相比忽略 ISB 的定位精度有所下降,收敛时间有所增加。这是由于 ISB 与接收机类型、天线类型、观测值质量、BDS 精密产品处理策略等均存在较强的相关性,在 ISB 变化较小的测站采用估计 ISB 的数据处理策略可能会造成定位精度的下降。同时,ISB_{CT}相比 ISB_{NO}定位性能下降可能受到接收机类型、观测噪声等因素的影响,ISB_{RW}相比 ISB_{NO}定位性能下降主要受限于随机游走过程噪声的影响,而 ISB_{RW}相比 ISB_{NO}定位性能下降可能是较大的先验噪声对 ISB 的特性适应性较差。

表 3 BDS-2/BDS-3 相比 BDS-2 定位性能提升情况 %

测站点	定位性能			收敛时间
	E 方向	N 方向	U 方向	
BRUX	57.93	70.48	42.74	97.91
CEDU	28.71	37.48	16.34	78.95
CUT0	21.11	47.51	18.19	69.50
HARB	37.33	62.45	47.01	91.59
HOB2	44.94	49.06	47.38	96.18
PTBB	59.72	53.00	50.98	89.34

为定量给出不同 ISB 数据处理策略间的优劣,本文将主要采用均值来进行比较与分析。经统计,使用 GBM 产品 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 处理策略的三维定位精度均值分别为 1.66、1.66、1.96、1.80 cm,收敛时间分别为 25.41、21.33、22.00、24.83 min;使用 WUM 产品 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 处理模式的三维定位精度均值分别为 1.66、1.66、1.77、1.80 cm,收敛时间分别为 25.41、21.33、21.58、24.83 min。事后 GBM 产品的定位平均精度和收敛时间分别 1.77 cm、23.29 min,事后 WUM 产品的定位平均精度与收敛时间分别 1.72 cm、23.29 min。对比可知,GBM 与 WUM 产品的定位性能基本一致,差异较小;估计 ISB 相比忽略 ISB 不同程度上明显缩短了收敛的时间。

此外,ISB_{RW}、ISB_{WN}的数据处理策略收敛时间与定位精度都较差,ISB_{RW}数据策略还取决于先验随机游走的噪声设置;ISB_{NO}与 ISB_{CT}的定位精度一致,但 ISB_{CT}相比 ISB_{NO}明显缩短了收敛的时间。因此,综合而言 ISB_{CT}的数据处理策略稍优。

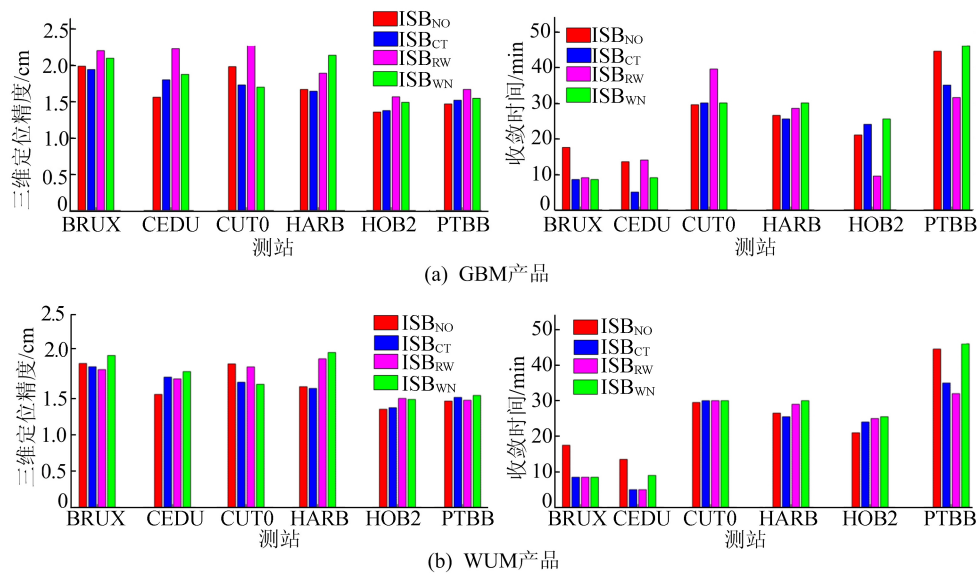


图 4 不同 ISB 处理策略 BDS-2/BDS-3 组合 PPP 定位性能比较

限于篇幅,BRUX-HOB2、BRUX-PTBB 链路的钟差序列如图 5 所示。不同 ISB 处理策略的钟差序列趋势一致,忽略与估计 ISB 策略的钟差序列均存在系统性的偏差,其中 ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN}处理策略间的偏差较小。同时部分钟差序列存在跳跃现象,这是接收机钟差吸收了部分 BDS 卫星钟差的跳变所引起的。

使用 GBM 产品,BRUX-HARB 链路 ISB_{NO}、

ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN}策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 118.45、118.45、118.47、118.52 ps; RUX-HOB2 链路 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN}策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 177.73、177.74、177.72、177.78 ps; BRUX-PTBB 链路 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN}策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 10.11、10.11、10.15、10.28 ps。使用 WUM 产品,

BRUX-HARB 链路 ISB_{NO} 、 ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 118.44、118.44、118.40、118.47 ps; RUX-HOB2 链路 ISB_{NO} 、 ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 177.79、177.80、177.84、

178.05 ps; BRUX-PTBB 链路 ISB_{NO} 、 ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 10.59、10.59、10.33、12.71 ps。使用 GBM 产品与 WUM 产品 RMS 值基本一致,而 ISB_{WN} 处理策略 RMS 值明显大于其他 ISB 处理策略。

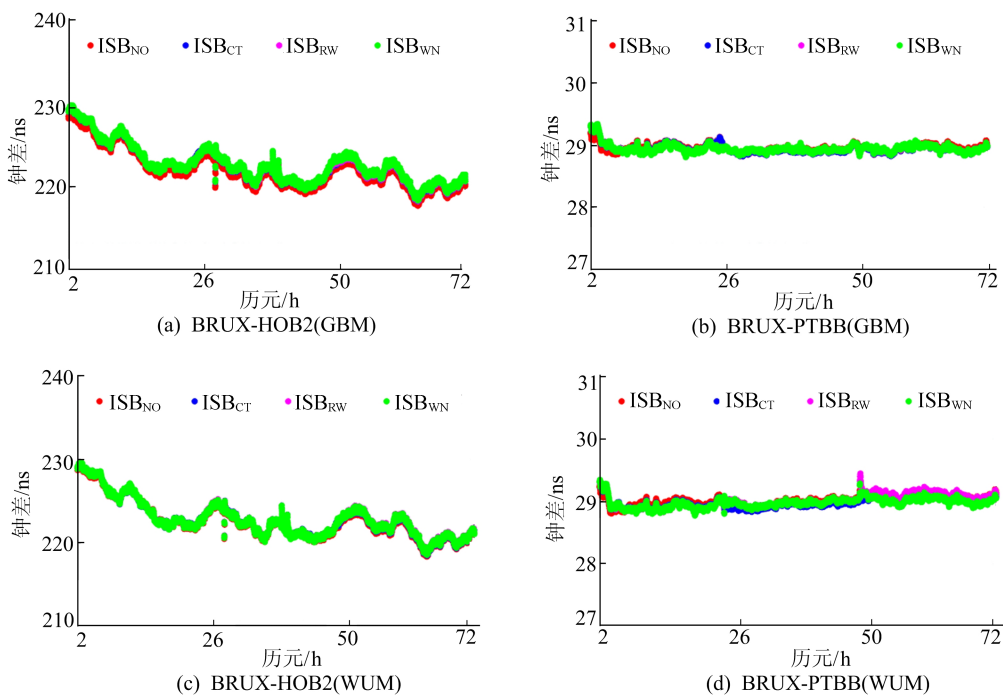


图 5 GBM、WUM 产品 BDS-2/BDS-3 组合钟差序列

使用 GBM 与 WUM 产品不同 ISB 处理策略

下时频传递的稳定度如图 6 所示。

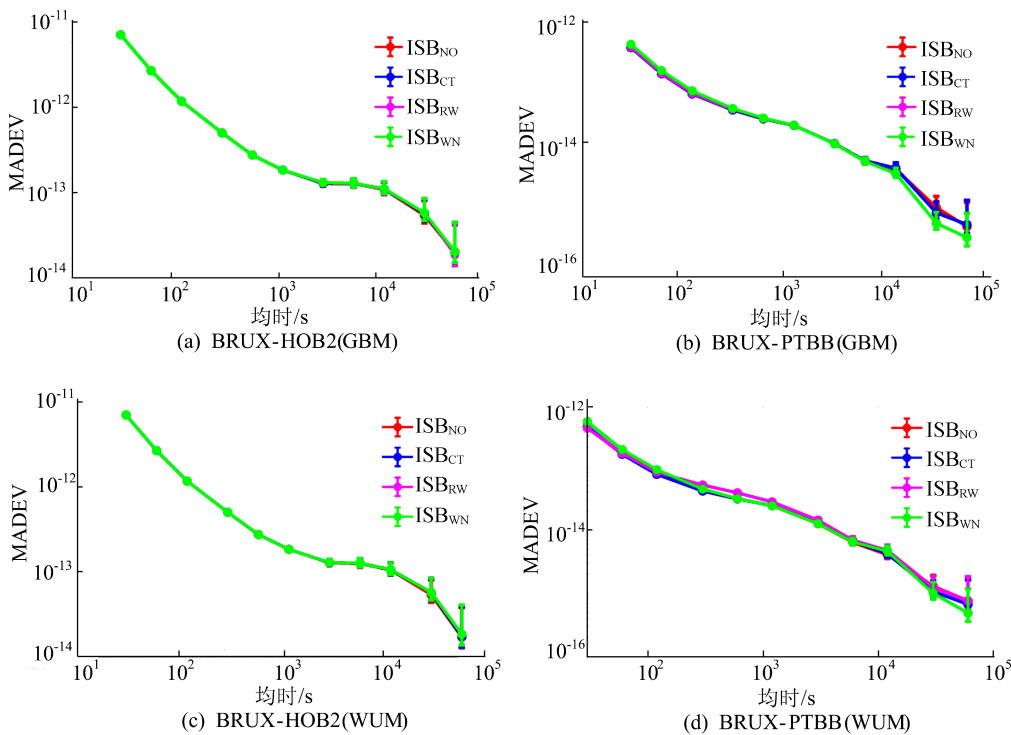


图 6 GBM 与 WUM 产品 BDS-2/BDS-3 时频传递 MADEV

WUM 与 GBM 产品解算的短期稳定度基本一致,长期稳定度存在部分差异,尤其在 BRUX-PTBB 链路中的表现的较为明显。因 BRUX 与 PTBB 站点均为 UTC 实验室站点,故 BRUX-PTBB 链路的时频传递稳定度优于 BRUX-HOB2 链路。经统计,在 BRUX-HOB2、BRUX-PTBB 链路中,使用 GBM 产品在 60 000 s 时的 MADEV 均值分别为 1.98×10^{-14} 、 5.35×10^{-16} ,使用 WUM 产品在 60 000 s 时的 MADEV 均值分别为 1.79×10^{-14} 、 6.71×10^{-16} 。使用 GBM 相比使用 WUM 在 BRUX-HOB2 链路的频率稳定度减低至 10.60%,而使用 GBM 相比使用 WUM 在 BRUX-PTBB 链路的频率稳定度提高约 25.40%。因此,使用 WUM 优于使用 GBM 的时频传递稳定度。ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 处理策略在 60 000 s 的 MADEV 均值分别为 9.77×10^{-15} 、 9.65×10^{-15} 、 9.57×10^{-15} 、 9.95×10^{-15} ;对比可知,ISB_{RW} 的频率稳定度最好,ISB_{WN} 策略的频率稳定度最差,ISB_{CT}、ISB_{RW} 相比 ISB_{NO} 在 60 000 s 的频率稳定度分别提高了约 1.23%、2.04%。

2.3 BDS-2/BDS-3 仿实时 PPP 实验分析

CLK93 实时产品与 GBM 最终产品在径向、切向、法向及钟差偏差的 RMS 值如图 7 所示。

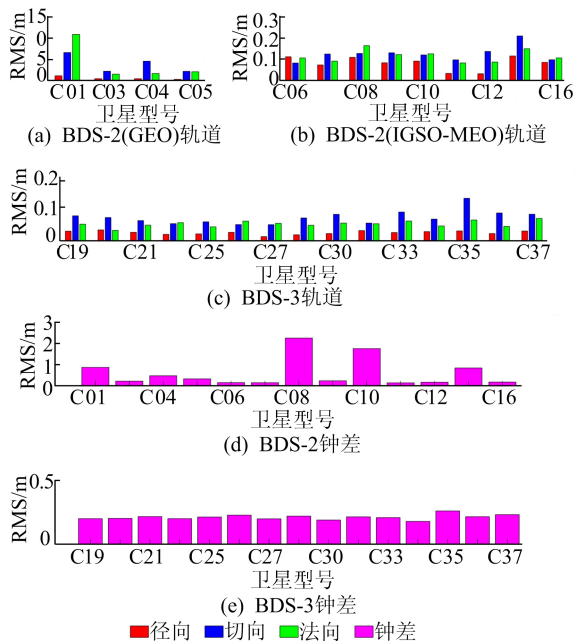


图 7 实时 CLK93 产品轨道与钟差的精度

BDS-2 GEO 卫星实时轨道精度最差,且 BDS-2 的轨道与钟差精度均弱于 BDS-3。经统计,BDS-2 GEO 卫星径向、切向、法向与钟差的

RMS 均值分别为 0.534、3.863、4.020、0.474 m, BDS-2 IGSO/MEO 卫星径向、切向、法向与钟差的 RMS 均值分别为 0.081、0.125、0.115、0.654 m, BDS-3 卫星径向、切向、法向、钟差的 RMS 均值分别为 0.026、0.074、0.054、0.212 m。BDS-3 相比 BDS-2 GEO 卫星实时产品平均精度高了约 37.35 倍,相比 BDS-2 IGSO/MEO 卫星实时产品平均精度提高了约 2.50 倍。

分别对 BDS-2/BDS-3 ISB 参数采取忽略、常数估计、随机游走估计、白噪声估计策略进行 PPP 仿实时解算,各种策略下的 PPP 定位精度及收敛时间如图 8 所示。

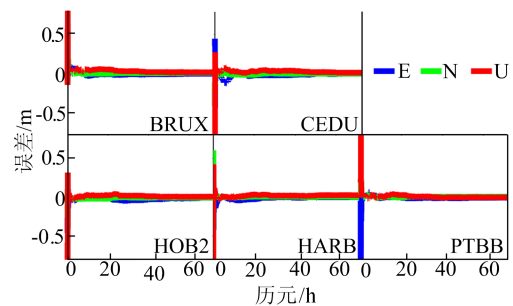


图 8 BDS-2/BDS-3 组合 ISB_{RW} 策略 PPP 仿实时收敛曲线

由图 8 可知,相比事后 PPP,实时 PPP 在收敛前期明显存在大幅度的跳动,且收敛时间较长。CUT0 站点可能受观测噪声影响,PPP 存在不收敛的现象,因此后续不分析 CUT0 站点。

BDS-2/BDS-3 组合仿实时定位精度与收敛时间如图 9 所示。经统计,仿实时解算下 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 处理策略的三维定位精度均值分别为 2.95、2.94、3.25、3.31 cm,收敛时间分别为 29.8、31.2、34.9、44.6 min;BRUX、CEBR、HARB、HBO2、PTBB 三维平均定位精度分别为 3.78、3.65、3.02、2.45、2.67 cm,平均收敛时间分别为 33.3、14.0、77.0、20.8、30.5 min。各测站的三维平均收敛精度都优于 4.0 cm, HARB 测站的收敛时间较长,收敛时间(除 HARB 站)均优于 35.0 min。估计 ISB 的策略相比忽略 ISB 的策略在不同程度上增加了收敛的时间。此外,ISB_{RW}、ISB_{WN} 的数据处理策略收敛时间与定位精度都较差,ISB_{NO} 比 ISB_{CT} 的定位精度基本一致,收敛时间有所增加。CLK93 产品仿实时解算的平均定位精度与收敛时间分别 3.11 cm、35.1 min,相比使用 GBM 与 WUM 产品 PPP 解算的定位精度下降了约 43.08%、44.69%,收敛时间增加了约 33.41%、33.69%。

限于篇幅,本文仅给出了 BRUX-HOB2、BRUX-PTBB 链路仿实时的钟差序列如图 10 所示。不同 ISB 处理策略的钟差序列趋势一致,钟差序列间存在系统的偏差,在收敛时刻的偏差波动较大,收敛后偏差逐渐趋于稳定。经统计,BRUX-HARB 链路 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 118.89、118.89、118.94、119.17 ps;RUX-HOB2 链路 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 策略下钟差序列

历元间差分 RMS 值分别为 178.09、178.13、178.10、178.12 ps;BRUX-PTBB 链路 ISB_{NO}、ISB_{CT}、ISB_{RW}、ISB_{WN} 策略下钟差序列历元间差分的 RMS 值分别为 10.15、10.15、10.02、10.87 ps。各种处理策略下的历元间差分 RMS 值差别不大,部分链路估计 ISB 相比忽略 ISB 的 RMS 值反而出现增大现象。

不同 ISB 处理策略 BDS-2/BDS-3 组合仿实时 PPP 时频传递的稳定度如图 11 所示。

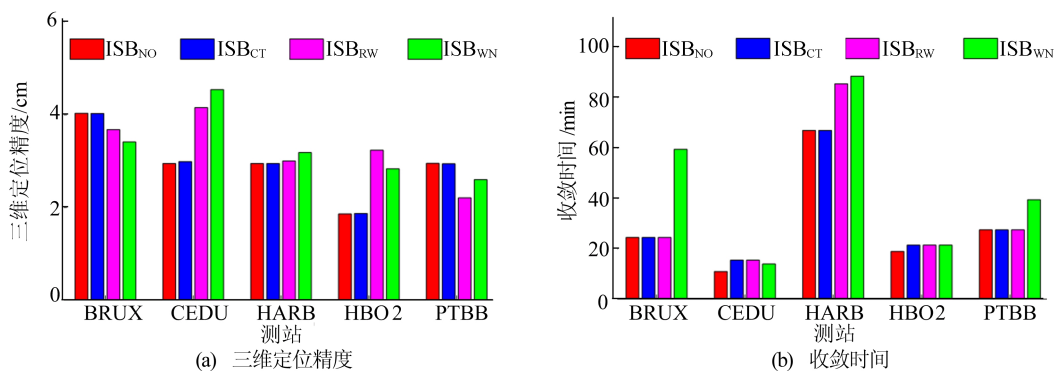


图 9 BDS-2/BDS-3 组合仿实时不同 ISB 处理策略定位性能

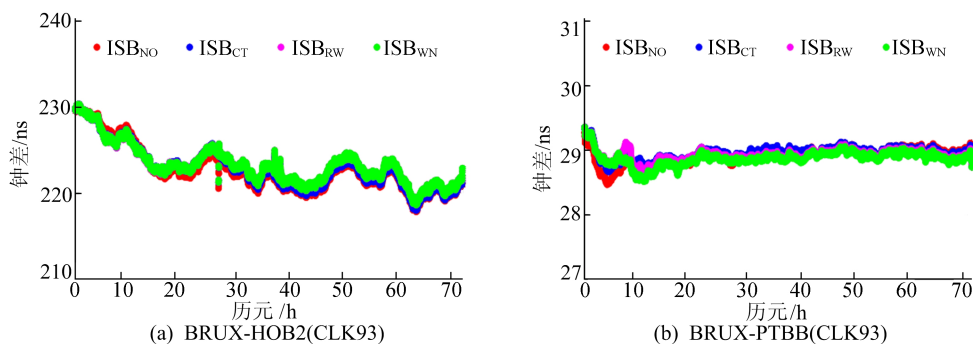


图 10 BDS-2/BDS-3 组合仿实时不同 ISB 处理策略钟差序列

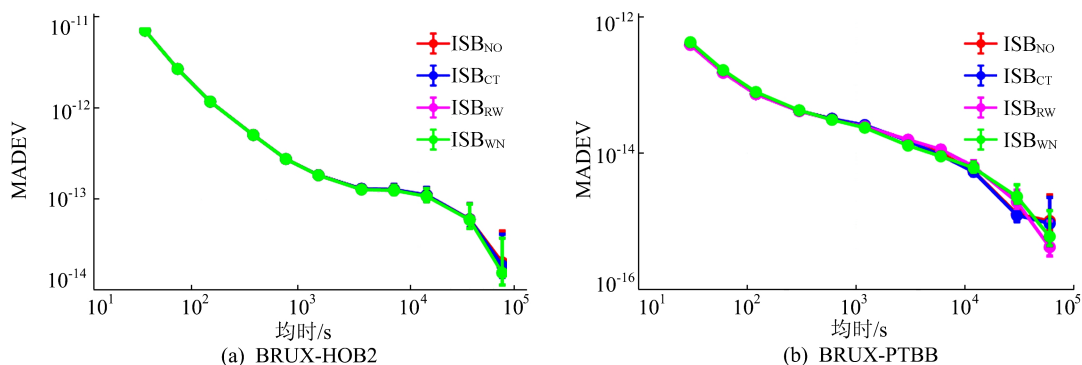


图 11 BDS-2/BDS-3 组合仿实时不同 ISB 处理策略频率稳定度

不同的处理策略在短期稳定度基本一致,长期稳定度存在差异(BRUX-PTBB 链路)。经统计,BRUX-HOB2、BRUX-PTBB 链路在 60 000 s

的 MADEV 均值分别为 1.76×10^{-14} 、 6.53×10^{-16} ;使用 CLK93 实时产品相比使用 GBM、WUM 事后产品在 BRUX-PTBB 链路的频率稳

定度提高约 11.10%、18.80%;使用 CLK93 实时产品相比使用 GBM、WUM 事后产品在 BRUX-PTBB 链路的频率稳定度提高约 1.67%、2.68%;说明使用 CLK93 产品在长期稳定度上也可以接近甚至优于使用事后 GBM、WUM 产品。 ISB_{NO} 、 ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 处理策略在 60 000 s 的 MADEV 均值分别为 1.07×10^{-14} 、 9.84×10^{-15} 、 7.99×10^{-15} 、 8.11×10^{-15} 。比较可知, ISB_{RW} 策略的频率稳定度最优, ISB_{NO} 策略的频率稳定度最差, ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 相比 ISB_{NO} 在 60 000 s 的频率稳定度分别提高了约 8.03%、25.32%、24.21%。

3 结 论

针对 BDS-2 与 BDS-3 间存在的 ISB 会对 PPP 解算带来影响,采取了忽略 ISB、ISB 估计为常数、ISB 估计为随机游走、ISB 估计为白噪声 4 种策略对 BDS-2/BDS-3 组合精密定位及时频传递的性能进行评估。为消除精密产品带来的影响,分别采用武汉大学发布的 WUM 精密产品、GFZ 发布的 GBM 精密产品及 CNES 提供的 CLK93 实时产品,以 MGEX 网 6 个站点连续 3 d 的观测数据进行实验。实验结果表明:相比单 BDS-2 系统,BDS-2/BDS-3 组合系统的定位性能提升明显,定位精度平均提高 44.02%,收敛时间缩短 87.25%。使用事后 GBM、WUM 产品的平均定位精度、收敛时间都在 1.7 cm、23.3 min,估计 ISB 的定位及时频传递性能均稍优于 ISB_{NO} 策略, ISB_{CT} 的数据处理策略最优。CLK93 产品仿实时 PPP 三维平均精度优于 4.0 cm,仿实时长期稳定度接近甚至优于事后 GBM 与 WUM 产品处理结果;估计 ISB 与不估计 ISB 的定位精度相当、收敛时间缩短、时频传递稳定度所提升, ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 、 ISB_{WN} 相比 ISB_{NO} 在 60 000s 的频率稳定度分别提高了约 8.03%、25.32%、24.21%。综合而言,BDS-2/BDS-3 组合 ISB_{CT} 、 ISB_{RW} 策略优于 ISB_{NO} 、 ISB_{WN} 策略的定位及时频传递性能。

[参 考 文 献]

- [1] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic performance and future developments of BeiDou Global Navigation Satellite System[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 1.
- [2] LI R, ZHENG S Y, WANG E S, et al. Advances in BeiDou Navigation Satellite System (BDS) and satellite navigation augmentation technologies[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1:
- [3] HEIN G W. Status perspectives and trends of satellite navigation[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 22.
- [4] LIU J, GAO K, GUO W, et al. Role, path, and vision of "5G+BDS/GNSS" [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 23.
- [5] JIAO G, SONG S, JIAO W. Improving BDS-2 and BDS-3 joint precise point positioning with time delay bias estimation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(2): 025001.
- [6] JIAO G, SONG S, CHEN Q, et al. Modeling and analysis of BDS-2 and BDS-3 combined precise time and frequency transfer considering stochastic models of inter-system bias [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 793.
- [7] QU L, DU M, WANG J, et al. Precise point positioning ambiguity resolution by integrating BDS-3e into BDS-2 and GPS[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 1-11.
- [8] XIE X, GENG T, ZHAO Q, et al. Precise orbit determination for BDS-3 satellites using satellite-ground and inter-satellite link observations[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 1-12.
- [9] CAO X, SHEN F, ZHANG S, et al. Satellite availability and positioning performance of uncombined precise point positioning using BeiDou-2 and BeiDou-3 multi-frequency signals [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(4): 1303-1316.
- [10] SHEN P L, CHENG F, LU X C, et al. An investigation of precise orbit and clock products for BDS-3 from different analysis centers[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1596.
- [11] 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: 108871.
- [12] SHI J, OUYANG C, HUANG Y, et al. Assessment of BDS-3 global positioning service: ephemeris, SPP, PPP, RTK, and new signal[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 81.
- [13] LI B, ZHANG Z, MIAO W, et al. Improved precise positioning with BDS-3 quad-frequency signals[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 30.
- [14] SU K, JIN S. Triple-frequency carrier phase precise time and frequency transfer models for BDS-3 [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 86.
- [15] JIN S, SU K. PPP models and performances from single-to-quad-frequency BDS observations[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 16.
- [16] QIN W, GE Y, ZHANG Z, et al. Accounting BDS3-BDS2 inter-system biases for precise time transfer[J]. *Measurement*, 2020, 156: 107566.
- [17] ZHAO W, CHEN H, GAO Y, et al. Evaluation of inter-system bias between BDS-2 and BDS-3 satellites and its impact on precise point positioning[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 2185.
- [18] CHEN L, LI M, ZHAO Y, et al. Clustering code biases between BDS-2 and BDS-3 satellites and effects on joint solution[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 15.

- [19] CAO X, SHEN F, ZHANG S, et al. Time delay bias between the second and third generation of BeiDou Navigation Satellite System and its effect on precise point positioning[J]. *Measurement*, 2021, 168: 108348.
- [20] LEICK A, RAPOPORT L, TATARNIKOV D. GPS satellite surveying[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [21] WANNINGER L, BEER S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy[J]. *GPS Solutions*, 2014, 19(4): 639-648.
- [22] ZHANG B, TEUNISSEN P J, YUAN Y, et al. Joint estimation of vertical total electron content (VTEC) and satellite differential code biases (SDCBs) using low-cost receivers[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 401-413.
- [23] PETIT G, LUZUM B. The 2010 reference edition of the IERS conventions[C]//Reference frames for applications in geosciences. Berlin: Springer, 2013: 57-61.
- [24] KOUBA J. A guide to using International GNSS Service (IGS) products[J]. *IGS Website*, 2002, 4(3): 106.
- [25] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. *Astrodynamic*, 1991, 1992: 1647-1660.
- [26] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. *Bulletin Geodesique*, 1972, 105(1): 279-298.
- [27] BHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): 3-6.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1182 页)

- [8] SALEHI F, GHIJI M, CHEN L. Large eddy simulation of high pressure spray with the focus on injection pressure [J]. *The International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, 82: 108551.
- [9] ARMIN W, VILLE V, OSSI K, et al. Large eddy simulations of high-velocity fuel sprays: studying mesh resolution and breakup model effects for Spray A[J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 23(5): 419-442.
- [10] BANERJEE S, RUTLAND C. On LES grid criteria for spray induced turbulence; SAE Technical Paper 2012-01-0141[R]. [S. l.]: SAE, 2012.
- [11] PAIK J, SOTIROPOULOS F, PORTE-AGEL F. Detached eddy simulation of flow around two wall-mounted cubes in tandem[J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2009, 30(2): 286-305.
- [12] MENTER F R, EGOROV Y. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions; part 1: theory and model description[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2010, 85(1): 113-138.
- [13] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model [J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(4): 1103-1108.
- [14] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2013, 71(11): 1341-1360.
- [15] JEONG E, GIRIMAJI S S. Partially averaged Navier-Stokes (PANS) method for turbulence simulations; flow past a square cylinder[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(12): 121203.
- [16] 耿超, 张玉银, 徐斌, 等. 喷雾特性 CFD 仿真的准确性与效率的探讨[J]. *内燃机工程*, 2015, 36(6): 130-136.
- [17] SENECAI P K, POMRANING E, RICHARDS K J, et al. An investigation of grid convergence for spray simulations using an LES turbulence model; SAE Technical Paper 2013-01-1083[R]. [S. l.]: SAE, 2013.
- [18] SENECAI P K, POMRANING E, RICHARDS K J, et al. Grid-convergent spray models for internal combustion engine computational fluid dynamics simulations[J]. *Journal of Energy Resources Technology Transactions of the Asme*, 2014, 136(1): 2280-2285.
- [19] WEHRFRITZ A, KAARIO O, VUORINEN V, et al. Large eddy simulation of n-dodecane spray flames using Flamelet Generated Manifolds[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 167: 113-131.
- [20] WEI H, ZHAO W, ZHOU L, et al. Large eddy simulation of the low temperature ignition and combustion processes on spray flame with the linear eddy model[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2018, 22(2): 237-263.
- [21] LI C, CRUA C, VOGIATZAKI K. Effect of the scale resolution on the two phase coupling characteristics of high speed evaporating sprays using LES/Eulerian-Lagrangian methodologies [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 120: 103060.
- [22] BANERJEE S, RUTLAND C J. Study of spray induced turbulence using large eddy simulations[J]. *Atomization & Sprays*, 2015, 25(4): 285-316.

(责任编辑 胡亚敏)