



# 一种改进的BDS-2/BDS-3联合精密定轨系统 偏差处理模型

胡超<sup>1,2,3</sup> 王中元<sup>1,3</sup> 王潜心<sup>1,3</sup> 饶鹏文<sup>1,3</sup>

1 中国矿业大学自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室,江苏 徐州,221116

2 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院,安徽 淮南,232001

3 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

**摘要:**针对BDS-2与BDS-3卫星之间的差异性,为实现观测数据深度融合,对BDS-2/BDS-3联合定轨中系统偏差(inter-satellite bias, ISB)模型进行研究。首先,基于奇异值分解提取相邻历元观测信息以增加数据利用率,提高ISB解算精度与可靠性;其次,分析了BDS-2/BDS-3联合定轨中ISB特性,发现新信号与BDS-2之间存在明显与接收机相关偏差;随后,利用定轨法方程求解ISB与轨道相关性,结果显示,ISB对北斗轨道精度影响较GPS(global positioning system)显著;最后,通过对ISB时间序列建立短期预报模型,并将预报值作为约束条件引入超快速定轨中。实验结果表明,针对BDS-2/BDS-3超快速轨道,利用提出的ISB的估计与预报模型,可分别改善BDS-2与BDS-3轨道18 h重叠弧段精度(一维)0.4~1.0 cm与0.8~4.1 cm。因此,所提出的改进的ISB处理模型对优化BDS-2/BDS-3联合定轨策略具有一定参考意义。

**关键词:**BDS-2/BDS-3联合定轨;系统偏差;奇异值分解;短期预报;超快速轨道

中图分类号:P228

文献标志码:A

北斗卫星导航系统正按照先试验、后区域、再全球的三步走战略稳步推进<sup>[1]</sup>,即导航验证系统(BDS-1)、区域服务系统(BDS-2)和全球覆盖系统(BDS-3)3个阶段<sup>[2]</sup>。自2015年3月,第一颗BDS-3试验卫星(BDS-3e)入轨,标志北斗导航系统由区域向全球发展。截至2018年12月,共4颗BDS-3试验卫星(C18、C19、C28、C31)和19颗工作卫星(C20~C27、C29~C37、C47、C48)在轨工作。于2020年实现30颗BDS-3组网星服务:3颗GEO(geostationary orbit satellite)、3颗IGSO(inclined geosynchronous orbit)、24颗MEO(medium earth orbit),真正实现了中国北斗卫星导航系统由区域向全球服务的飞跃<sup>[3]</sup>。

考虑到BDS-2与BDS-3为北斗系统建设的不同阶段,其相应的精密定轨研究重点不尽相同。针对BDS-2轨道研究主要集中于3个方面:(1)基于区域跟踪网<sup>[4-5]</sup>,研究地面跟踪站受限条

件下的定轨策略;(2)卫星几何和物理模型<sup>[6-8]</sup>,如姿态模型等;(3)多卫星导航系统联合定轨<sup>[9-10]</sup>。评估表明,BDS-2的MEO/IGSO和GEO一天重叠弧段不符值分别由0.5 m和3.0 m提升至优于0.2 m与1.0 m<sup>[11-12]</sup>。而BDS-3定轨热点主要包括3点:(1)卫星观测数据、卫星钟差以及轨道测定精度等分析<sup>[13-14]</sup>;(2)评估星间链路对轨道、钟差测定精度影响<sup>[3,15]</sup>;(3)融合星间与星地观测数据的BDS-2/BDS-3联合定轨技术研究<sup>[16]</sup>。结果显示,BDS-3试验卫星轨道重叠弧段径向与切向分别由10.0 cm和25.0 cm提升至3.7 cm与7.9 cm,且星载原子钟日稳定性较BDS-2提高了一个量级<sup>[14,17]</sup>。

综上,BDS-3新卫星、新技术与新信号的引入,使BDS-3卫星具备更强性能,也对北斗卫星精密定轨提出了新挑战:卫星几何形状的改变将可能导致现有几何与物理模型不再适用,BDS-3

收稿日期:2019-11-15

项目资助:国家自然科学基金(41874039);江苏省自然科学基金(BK20181361);江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX19\_0906);安徽高校自然科学研究项目(KJ2020A0310)。

第一作者:胡超,博士,主要从事GNSS精密轨道确定方法研究。chaohu2014gnss@163.com

通讯作者:王中元,博士,副教授。wzy@cumt.edu.cn

卫星潜在的优势与价值尚未充分挖掘利用。考虑当前北斗系统建设现状,未来一段时间内北斗系统将由 BDS-3 与 BDS-2 共同提供服务,因此,研究 BDS-3/BDS-2 联合精密定轨,充分利用 BDS-2 卫星资源,挖掘 BDS-3 新技术优势,是当前北斗导航系统数据处理的有效途径之一。

BDS-2 与 BDS-3 卫星之间的差异将不可避免地导致不同卫星以及观测数据之间产生与接收机相关的偏差<sup>[18]</sup>。GNSS (global navigation satellite system) 数据融合处理中,将不同卫星系统存在于观测数据中的偏差定义为系统偏差 (inter-satellite bias, ISB),这是 GNSS 数据融合的关键问题之一<sup>[2, 19-21]</sup>。由于 BDS-3 尚处于建设阶段, BDS-2 与 BDS-3 之间系统偏差缺少深入研究,其将直接影响 BDS-2 与 BDS-3 深度融合与兼容互操作,因此,深入研究 BDS-2 与 BDS-3 之间系统偏差是实现联合定轨的必要前提。

研究表明, ISB 是 GNSS 观测数据联合处理必须考虑的参数,且 BDS-2 不同类型卫星 (GEO、IGSO、MEO) 之间同样存在偏差<sup>[22]</sup>。为降低 ISB 对多系统数据融合处理的影响,主要有 3 种策略: (1) 星间单差实现多系统松组合<sup>[23]</sup>; (2) 非差观测模型估计 ISB 参数估计,实现多系统的紧组合<sup>[24]</sup>; (3) 将 ISB 参数与接收机钟差、模糊度以及伪距残差合并,简化数据处理模型<sup>[25]</sup>。BDS-2/BDS-3 联合定轨中, Li 等<sup>[17]</sup>通过 iGMAS (inter-

$$\begin{cases} \varphi_{\text{BDS-3}} = \psi_{\text{BDS-3}} \times (\Phi_{\text{BDS-3}} \times \mathbf{o}_{\text{BDS-3}} - \mathbf{r}) - \Delta t_{\text{BDS-3}} + \Delta t + \lambda_{\text{BDS-3}} \times (b_{\text{BDS-3}} - p_{\text{BDS-3}} + N_{\text{BDS-3}}) + m \times Z + \epsilon_{\text{BDS-3}} \\ \varphi_{\text{BDS-2}} = \psi_{\text{BDS-2}} \times (\Phi_{\text{BDS-2}} \times \mathbf{o}_{\text{BDS-2}} - \mathbf{r}) - \Delta t_{\text{BDS-2}} + \Delta t + \lambda_{\text{BDS-2}} \times (b_{\text{BDS-2}} - p_{\text{BDS-2}} + N_{\text{BDS-2}}) + m \times Z + \epsilon_{\text{BDS-2}} \\ \varphi_{\text{GPS}} = \psi_{\text{GPS}} \times (\Phi_{\text{GPS}} \times \mathbf{o}_{\text{GPS}} - \mathbf{r}) - \Delta t_{\text{GPS}} + \Delta t + \lambda_{\text{GPS}} \times (b_{\text{GPS}} - p_{\text{GPS}} + N_{\text{GPS}}) + m \times Z + \epsilon_{\text{GPS}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{BDS-3}} = \psi_{\text{BDS-3}} \times (\Phi_{\text{BDS-3}} \times \mathbf{o}_{\text{BDS-3}} - \mathbf{r}) - \Delta t_{\text{BDS-3}} + \Delta t + c \times (d_{\text{BDS-3}} - u_{\text{BDS-3}}) + m \times Z + e_{\text{BDS-3}} \\ \rho_{\text{BDS-2}} = \psi_{\text{BDS-2}} \times (\Phi_{\text{BDS-2}} \times \mathbf{o}_{\text{BDS-2}} - \mathbf{r}) - \Delta t_{\text{BDS-2}} + \Delta t + c \times (d_{\text{BDS-2}} - u_{\text{BDS-2}}) + m \times Z + e_{\text{BDS-2}} \\ \rho_{\text{GPS}} = \psi_{\text{GPS}} \times (\Phi_{\text{GPS}} \times \mathbf{o}_{\text{GPS}} - \mathbf{r}) - \Delta t_{\text{GPS}} + \Delta t + c \times (d_{\text{GPS}} - u_{\text{GPS}}) + m \times Z + e_{\text{GPS}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\psi$  为星地方向向量;  $\lambda$ ,  $\Phi$ ,  $\mathbf{o}$ ,  $\mathbf{r}$  分别表示波长、旋转矩阵向量、卫星初始状态向量和测站位置向量;  $\Delta t_{\text{GPS}}$ ,  $\Delta t$  分别表示接收机钟差与卫星钟差参数;  $c$ ,  $m$ ,  $Z$ ,  $N$  分别为光速、对流层映射函数、对流层天顶延迟参数和模糊度参数;  $d_{\text{GPS}}$ ,  $u_{\text{GPS}}$  与  $b_{\text{GPS}}$ ,  $p_{\text{GPS}}$  分别表示接收机与卫星对应的伪距和相位硬件延迟;  $e$ ,  $\epsilon$  分别表示伪距、载波相位观测方程残差向量。令:

$$\begin{cases} \Delta \bar{t}_{\text{GPS}} = \Delta t + c \times d_{\text{GPS}} \\ \Delta \bar{t}_{\text{BDS-2}} = \Delta t + c \times d_{\text{BDS-2}} = \Delta \bar{t}_{\text{GPS}} + I_{\text{GPS\_BDS-2}} \\ \Delta \bar{t}_{\text{BDS-3}} = \Delta t + c \times d_{\text{BDS-3}} = \Delta \bar{t}_{\text{GPS}} + I_{\text{GPS\_BDS-3}} \end{cases} \quad (3)$$

tional GNSS monitoring and assessment system) 跟踪站的 B1I/B3I 数据验证了 BDS-3e 与 BDS-2 间无明显偏差; Hu 等<sup>[26]</sup>基于两步法,通过引入七参数消除 BDS-2 与 BDS-3e 之间的系统偏差。

针对北斗不同类型卫星联合其他多系统数据处理时, ISB 处理策略可归为: 忽略 ISB 参数、同一参数及不同参数。需要注意的是,所有的处理方法都是以 ISB 天稳定参数为前提。在考虑 BDS-2/BDS-3 联合定轨 ISB 未充分研究且尚未实现观测数据的深度融合的前提下, ISB 处理策略存在诸多不合理之处,尤其对于轨道精度与计算时效性有严格要求的超快速产品<sup>[27]</sup>。超快速精密定轨受时效性与跟踪站等限制,无法利用足够的观测数据实现参数高精度解算。研究发现<sup>[28]</sup>, 不施加约束条件下,超快速轨道边界存在发散现象,其将进一步降低 ISB 参数的解算精度。本文将从 BDS-2/BDS-3 联合定轨角度出发, 研究与分析 ISB 参数特性及其处理方法。

## 1 联合定轨 ISB 处理模型

### 1.1 联合定轨 ISB 参数估计原理

由于北斗跟踪站受限, BDS-2/BDS-3 联合定轨过程中引入 GPS (global positioning system) 数据以提高参数解算可靠性。式(1)、式(2)分别表示载波相位和伪距观测方程, 设非差消电离层组合 GPS/BDS-2/BDS-3 联合定轨观测方程为<sup>[17]</sup>:

式中,  $I_{\text{GPS\_BDS-2}}$  与  $I_{\text{GPS\_BDS-3}}$  分别表示 GPS 与 BDS-2 和 BDS-3 之间的偏差。设模糊度参数为:

$$\begin{cases} \bar{N}_{\text{GPS}} = b_{\text{GPS}} - p_{\text{GPS}} + N_{\text{GPS}} \\ \bar{N}_{\text{BDS-2}} = b_{\text{BDS-2}} - p_{\text{BDS-2}} + N_{\text{BDS-2}} \\ \bar{N}_{\text{BDS-3}} = b_{\text{BDS-3}} - p_{\text{BDS-3}} + N_{\text{BDS-3}} \end{cases} \quad (4)$$

参数处理过程中, 为避免法方程秩亏, 需对 ISB 参数构建零均值约束条件, 即:

$$\begin{cases} (I_{\text{GPS\_BDS-2}})_1 + (I_{\text{GPS\_BDS-2}})_2 + \dots + (I_{\text{GPS\_BDS-2}})_n = 0 \\ (I_{\text{GPS\_BDS-3}})_1 + (I_{\text{GPS\_BDS-3}})_2 + \dots + (I_{\text{GPS\_BDS-3}})_n = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $n$  表示测站数。设某测站, BDS-2 与 BDS-3

之间系统偏差表示为:

$$I_{\text{BDS-3,BDS-2}} = I_{\text{GPS,BDS-3}} - I_{\text{GPS,BDS-2}} \quad (6)$$

上述参数处理中,引入GPS观测数据以提高参数解算精度。但是,BDS-2/BDS-3联合定轨中ISB处理模型仍存在明显不足:(1)基于ISB天稳定的前提,其稳定性主要表现为观测弧段中间部分,两端易出现波动现象;(2)未充分挖掘前后历元观测信息,导致观测数据受限条件下,参数估计可靠性降低。

## 1.2 改进的联合定轨ISB处理模型

针对联合定轨中ISB存在的问题,可通过优化定轨策略,如对测站坐标、对流层、钟差等参数施加强约束条件;充分利用ISB参数稳定特性,实现参数估计随机模型精化。而对于观测信息利用不充分,可通过观测值域内奇异值分解,将历元间观测信息进行有效传递。

为提高BDS-2/BDS-3联合定轨中ISB参数解算精度,准确分析偏差参数特性,本文提出一种改进的联合定轨ISB估计方法,充分提取历元间观测信息,并对数据中断与观测弧段两端ISB参数进行短期预报。具体可参见文献[29],为便于论述,将式(1)与式(2)简化,即第 $k$ 个历元为:

$$l_k = \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \rho_k \end{bmatrix} = G_k \beta_k + \eta_k \quad (7)$$

式中, $\beta$ 中包含卫星轨道、ISB等定轨待估参数; $\eta$ 为残差矩阵。首先,对系数矩阵 $G_k$ 进行分解:

$$G_k = U_k^T \begin{bmatrix} D_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V_k = \begin{bmatrix} U_{k,1} \\ U_{k,2} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} D_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k,1} \\ V_{k,2} \end{bmatrix} = U_{k,1}^T D_k V_{k,1} \quad (8)$$

式中, $D_k$ 为对角矩阵。令 $\theta_k = \begin{bmatrix} \theta_{k,1} \\ \theta_{k,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k,1} \beta_k \\ V_{k,2} \beta_k \end{bmatrix}$ ,

$$\begin{aligned} Q_{\mu\mu,k} &= \text{cov}[\mu_k] = A_{k-1} V_{k-1,1}^T Q_{\theta_1, \theta_1, k-1} V_{k-1,1} A_{k-1}^T + A_{k-1} V_{k-1,2}^T Q_{\theta_2, \theta_2, k-1} V_{k-1,2} A_{k-1}^T + \\ & Q_{\omega\omega,k} + Q_{\omega\omega,k-1} - A_{k-1} V_{k-1,1}^T C_{k-1} - C_{k-1}^T V_{k-1,1} A_{k-1}^T \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $C_{k-1}$ 为:

$$C_{k-1} = \text{cov}[d\hat{\theta}_{k-1,1}, \omega_{k-1}] \quad (18)$$

为便于讨论,令式(9)中:

$$\hat{\theta}_{k,2} = 0 \text{ 且 } Q_{\theta_2, \theta_2, k} = 0 \quad (19)$$

则式(17)化简为:

$$\begin{aligned} Q_{\mu\mu,k} &= A_{k-1} V_{k-1,1}^T Q_{\theta_1, \theta_1, k-1} V_{k-1,1} A_{k-1}^T + Q_{\omega\omega,k} + \\ & Q_{\omega\omega,k-1} - A_{k-1} V_{k-1,1}^T C_{k-1} - C_{k-1}^T V_{k-1,1} A_{k-1}^T \end{aligned} \quad (20)$$

同时:

$$Q_{\beta\beta,k} = \text{cov}[d\hat{\beta}_k] = (A_k^T Q_{\mu\mu,k}^{-1} A_k)^{-1} \quad (21)$$

因此,参数解为:

且 $\beta_k = V_k^T \theta_k = V_{k,1}^T \hat{\theta}_{k,1} + V_{k,2}^T \hat{\theta}_{k,2}$ , 则式(7)表示为:

$$\begin{bmatrix} U_{k,1} l_k \\ U_{k,2} l_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_k \theta_{k,1} \\ 0 \times \theta_{k,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{k,1} \eta_k \\ U_{k,2} \eta_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

将 $U_{k,1}$ 分解为 $U_{k,1,1}$ 与 $U_{k,1,2}$ ,则参数 $\theta_{k,1}$ 解可表示为:

$$\hat{\theta}_{k,1} = D_k^{-1} U_{k,1} l_k = D_k^{-1} [U_{k,1,1} \quad U_{k,1,2}] \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \rho_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

其对应协因数矩阵为:

$$Q_{\theta_1, \theta_1, k} = \text{cov}[d\hat{\theta}_{k,1}] = (U_{k,1,1}^T D_k^{-1} Q_{\varphi\varphi, k}^{-1} D_k^{-1} U_{k,1,1} + U_{k,1,2}^T D_k^{-1} Q_{\rho\rho, k}^{-1} D_k^{-1} U_{k,1,2})^{-1} \quad (11)$$

式中, $Q_{\varphi\varphi}$ 与 $Q_{\rho\rho}$ 分别对应式(1)与式(2)观测噪声协因数阵。为讨论历元间相关性,设第 $k$ 历元与第 $j$ 卫星对应的相位观测方程为:

$$\varphi_{k,j} = \alpha_{k,j}^T \beta_k + \lambda \times N_j + \epsilon_{k,j} \quad (12)$$

式中, $\alpha$ 为参数对应的系数矩阵; $N$ 为模糊度; $\epsilon$ 为模型噪声。对式(12)求历元间差分,消除模糊度参数及相关常量可得:

$$\delta\varphi_{k,j} = \alpha_{k,j}^T \beta_k - \alpha_{k-1,j}^T \beta_{k-1} + \epsilon_{k,j} - \epsilon_{k-1,j} \quad (13)$$

则当前相位观测方程可表示为:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{k,j} &= \delta\varphi_{k,j} + \alpha_{k-1,j}^T \hat{\beta}_{k-1} = \alpha_{k,j}^T \hat{\beta}_k + \\ & \alpha_{k-1,j}^T d\hat{\beta}_{k-1} + \epsilon_{k,j} - \epsilon_{k-1,j} \end{aligned} \quad (14)$$

类似式(12)~式(14),可得伪距历元间差分观测方程。则当前历元观测方程可表示为:

$$y_k = A_k \beta_k + A_{k-1} d\hat{\beta}_{k-1} + \omega_k - \omega_{k-1} \quad (15)$$

将式(10)代入式(15),可得:

$$\begin{aligned} y_k &= A_k \beta_k + A_{k-1} V_{k-1,1}^T d\hat{\theta}_{k-1,1} + \\ & A_{k-1} V_{k-1,2}^T d\hat{\theta}_{k-1,2} + \omega_k - \omega_{k-1} = A_k \beta_k + \mu_k \end{aligned} \quad (16)$$

式中,模型误差协因素为:

$$\hat{\beta}_k = Q_{\beta\beta,k} A_k^T Q_{\mu\mu,k}^{-1} y_k \quad (22)$$

采用上述参数估计策略,顾及历元间相关性,可实现ISB参数解算过程中观测信息的充分利用。同时,针对定轨过程中边界弧段发散现象<sup>[28]</sup>(由于轨道、钟差及ISB参数之间具有相关性,同样会导致ISB参数发散),有必要对两端ISB参数重新进行处理。本文采用多项式模型,对两端ISB进行约束处理。研究表明,一天内ISB趋于稳定。本文基于多项式模型对ISB进行拟合与预报,设当前历元ISB为 $\gamma$ ,则由多项式模型可得:

$$\hat{\gamma}(t) = \nu_0 + \nu_1 t + \dots + \nu_s t^s + \zeta'_m \quad (23)$$

式中,  $\nu$  为多项式系数;  $t$  为历元标记;  $\zeta'_m$  为模型拟合残差;  $s$  为模型阶数, 可由赤池准则<sup>[30]</sup>确定。式(23)可简化为:

$$\gamma = R\nu + d\nu \quad (24)$$

式中,  $R$  为模型系数矩阵。ISB 函数模型系数为:

$$\hat{\nu} = (R^T R)^{-1} R^T \gamma \quad (25)$$

设当前历元  $t=0$ , 则当前历元 ISB 延迟量为:

$$\bar{\gamma}(t) = \hat{\nu}_0 \quad (26)$$

通过式(26)逐历元求解观测弧段边界 ISB 参数, 实现整个弧段内 ISB 参数的准确求解。下面将利用对比实验进行 BDS-2/BDS-3 联合定轨中 ISB 参数分析。

## 2 联合定轨 ISB 参数实验与分析

### 2.1 联合定轨 ISB 参数估计结果

为探讨 BDS-2/BDS-3 联合定轨中 ISB 参数特性, 要先通过联合定轨实验进行相应分析。

实验利用 2018 年的年积日第 110 天至第 130 天的 MGEX (multi-GNSS experiment) 与 iGMAS 观测数据 (测站分布见图 1(a)) 进行 BDS-2、BDS-3e、BDS-3 和 GPS 卫星联合定轨; 定轨采用单天弧段, 其他策略参考文献[26]。

实验中, 分别基于 B1I/B3I 与 B1C/B2a 进行相应的验证, 并且 ISB 设置为一天对应一个常数解。

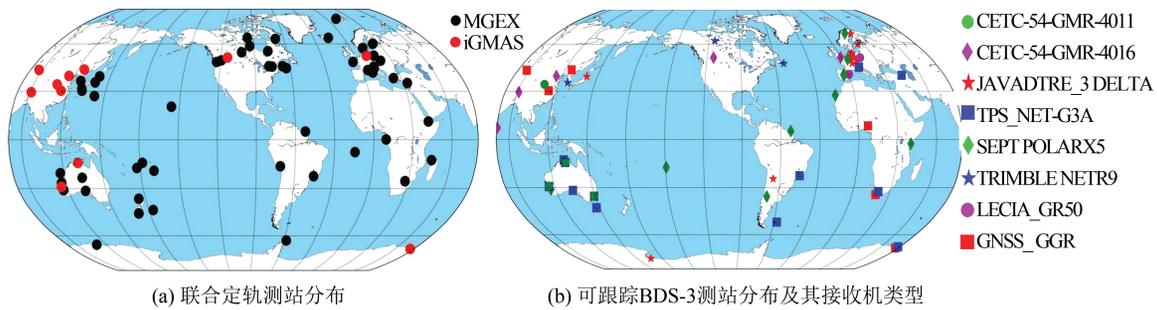


图 1 联合定轨 MGEX 与 iGMAS 测站分布

Fig.1 Distribution of MGEX and iGMAS Stations of Combined Orbit Determination

联合定轨实验步骤如下:

1) 利用北斗 B1I/B3I 观测数据分别进行 GPS+BDS-2、GPS+BDS-3e 与 GPS+BDS-3 联合定轨实验, 对各定轨组合中 ISB 参数接收机进行分类统计分析。

2) 增加基于 B1C/B2a 数据进行 GPS+BDS-3 联合定轨实验, 针对不同类型接收机提取 ISB 参数。实验中, 由于可跟踪 B1C/B2a 信号较少, 为提高参数解算的可靠性, 需要先固定站坐标、地

球自转参数、对流层等。

基于连续 21 d 的不同组合条件下 GPS 与 BDS 之间的 ISB 参数解算结果如图 2 所示。为具体分析北斗不同卫星以及不同观测数据条件下 BDS-2/BDS-3/BDS-3e 之间的系统偏差特性, 表 1 统计了不同类型接收机 BDS-2 与 BDS-3/BDS-3e 系统偏差 (通过对 GPS+BDS-2、GPS+BDS-3e 与 GPS+BDS-3 联合定轨中估计的系统偏差参数进行作差处理)。

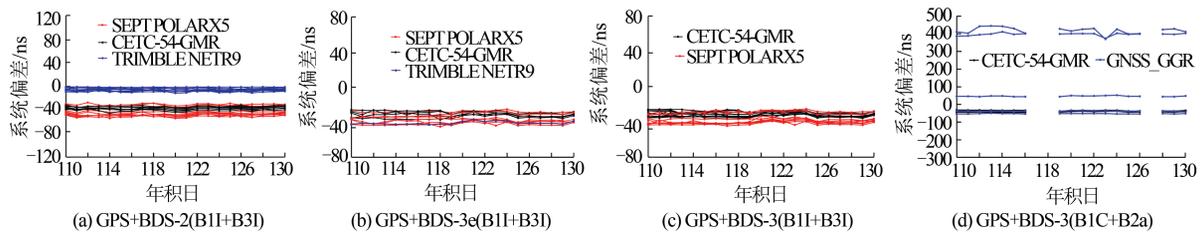


图 2 北斗不同频率 BDS/GPS 联合定轨 ISB 时间序列

Fig.2 ISB Time Series Between GPS and BeiDou Combined Orbit Determination

通过表 1 与图 2 中的实验结果可得如下主要结论:

1) GPS 与 BDS-2/BDS-3e/BDS-3 之间的系统偏差可通过联合定轨估计得到;

2) 不同类型接收机系统偏差稳定性存在较大差异, 且系统偏差参数以接收机类型分群;

3) 基于 B1I/B3I 观测数据, BDS-2 与 BDS-3e、BDS-2 与 BDS-3 之间偏差参数较小;

表1 联合定轨中BDS之间的系统偏差统计/ns

Tab.1 Results of ISB Parameters Between BDS-2, BDS-3 and BDS-3e of Combined Orbit Determination/ns

测站	接收机类型	BDS-2/BDS-3e 偏差	BDS-2/BDS-3 偏差	BDS-2/BDS-3 偏差
		(B1I/B3I)	(B1I/B3I)	(B1C/B2a)
BJF1	CETC-54-GMR-4016	0.71	0.58	27.28
BRCH		0.73	0.70	30.00
LHA1		1.03	0.63	28.37
WHU1		0.75	0.80	35.15
CLGY		0.74	0.98	37.03
ICUK		0.85	0.87	31.35
CANB	CETC-54-GMR-4011	0.82	0.85	30.01
DWIN		0.75	0.84	39.00
PETH		0.85	0.83	24.16
ZHON		0.69	0.77	35.93
ABJA	GNSS_GGR	0.81	0.81	23.66
HMNS		-2.04	-1.85	22.99
XIA1		-0.32	-0.32	22.70
GUA1	SEPT POLARX5	0.71	0.63	43.05
CHU1		0.75	0.79	23.98
ARUC		-0.96	0.43	-
STR1		-1.05	-0.10	-
DARW		-0.99	0.76	-
HOB2		-1.01	0.29	-
CHPI		-0.95	0.10	-
DAV1		-0.92	-0.67	-
TID1		-0.84	0.41	-

4) BDS-2 基于 B1I/B3I, 而 BDS-3 利用 B1C/B2a 观测数据, 结果显示, BDS-2 与 BDS-3 间存在明显的系统偏差。

实验时间段内, 可跟踪 BDS-3 新信号 (B1C/B2a) 的 MGEX 测站多为单频数据 (见图 1(b))。需要注意的是, 实验过程中主要存在两个因素影响 ISB 参数估计:

1) 实验是基于一天弧段内 ISB 具有较好的稳定性的前提, 通过设置一个 ISB 参数全弧段估计;

2) 北斗新信号可跟踪的测站数据有限, 且数据预处理过程中对质量较差的数据进行剔除, 势必影响 ISB 参数估计。

## 2.2 联合定轨中 ISB 参数相关性分析

为实现 BDS-2/BDS-3 联合定轨, 需对 ISB 进行合理的处理; 基于参数之间的相关性原理对 ISB 与轨道参数之间的相关性进行分析; 基于联合定轨法方程, 分析不同测站对应的 ISB 参数与卫星轨道参数之间的相关性。计算公式为:

$$r = \sigma_{12} / \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} \quad (27)$$

式中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_{12}$  分别对应参数方差及其协方差。

为便于讨论, 实验中卫星选取 G11 与 C11 卫星, 测站选取 iGMAS 测站 (WHU1) 与 MGEX 测站 (DARW), 统计年积日第 110 天相应测站 ISB 参数与卫星轨道的相关系数, 结果如表 2 所示。

表2 联合定轨中 ISB 与卫星轨道参数之间相关系数统计

Tab.2 Correlation Factors Between ISB and GPS/BDS Satellite Orbit Parameters Based on Combined Orbit Determinations

测站	卫星	X	Y	Z	$V_x$	$V_y$	$V_z$
WHU1	G11	$2.73 \times 10^{-5}$	$-1.55 \times 10^{-9}$	$-1.50 \times 10^{-9}$	$2.10 \times 10^{-5}$	$9.34 \times 10^{-2}$	$-1.42 \times 10^{-2}$
WHU1	C11	$1.98 \times 10^{-3}$	$4.70 \times 10^{-7}$	$1.03 \times 10^{-7}$	$-1.74 \times 10^{-5}$	$7.34 \times 10^{-2}$	$9.60 \times 10^{-2}$
DARW	C11	$2.76 \times 10^{-5}$	$-1.44 \times 10^{-9}$	$-1.76 \times 10^{-9}$	$2.14 \times 10^{-5}$	$7.21 \times 10^{-2}$	$-1.35 \times 10^{-2}$
DARW	C11	$1.99 \times 10^{-3}$	$4.71 \times 10^{-7}$	$1.03 \times 10^{-7}$	$-1.75 \times 10^{-3}$	$7.15 \times 10^{-2}$	$9.62 \times 10^{-2}$

由表 2 中的实验结果可知, GPS 与 BDS-2/BDS-3 联合定轨中, ISB 与北斗轨道各参数之间

较 GPS 相关系数高两个量级, 这是由于北斗跟踪站数据有限, 依赖单站的观测数据较 GPS 更强。

单站 ISB 与轨道之间相关系数数量级较小,这是由于定轨过程受参与解算的所有测站以及力学模型共同作用所致。

为进一步分析 ISB 参数对联合定轨精度的影响,设计 3 组对比实验进行分析说明。(1)方案一:联合 GPS+BDS-2+BDS-3+BDS-3e 定轨中不考虑 ISB 参数,即定轨过程中不设置任何 ISB 参数,实验中北斗基于 B1I/B3I 观测数据进行。(2)方案二:基于方案一,联合定轨中整体考虑一类 ISB 参数,即不考虑北斗卫星类型差异,对于同时跟踪 GPS 和北斗卫星的测站只考虑一个系统偏差参数。(3)方案三:基于方案二,分别考虑不

同类型卫星的 ISB 参数。对于同时跟踪 GPS 和北斗卫星的测站,依据卫星类型(BDS-2/BDS-3/BDS-3e)设置 ISB 参数。

基于 §2.1 定轨观测数据,统计 3 个定轨方案轨道精度。由于无法获得 BDS-3 参考轨道,本文仅统计轨道相对变化量,即以方案三为参考,分别统计其他两种方案的轨道相对变化量,其结果如图 3 所示。同时,为说明北斗不同观测数据引起的定轨差异,同样基于上述实验方案,BDS-2/BDS-3e 与 BDS-3 分别基于 B1I/B3I 和 B1C/B2a 进行联合定轨实验。精度统计以方案三作为参考,其相应统计结果如图 4 所示。

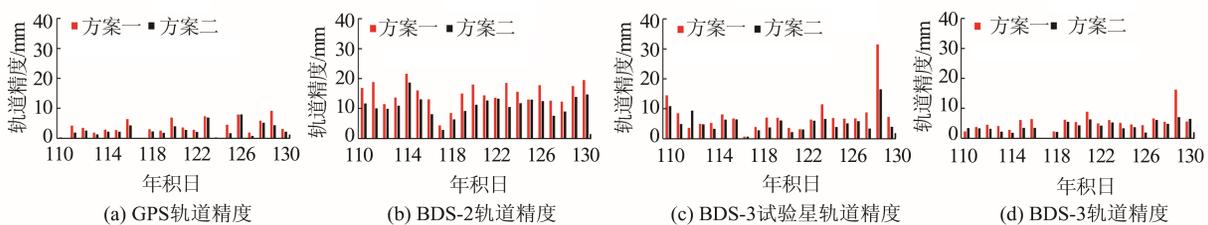


图 3 基于 B1I/B3I 频率(BDS-3)不同 ISB 参数模式下精密定轨精度相对变化

Fig. 3 Accuracy Variation of Precise Orbit Determination Based on Different ISB Models Under B1I/B3I

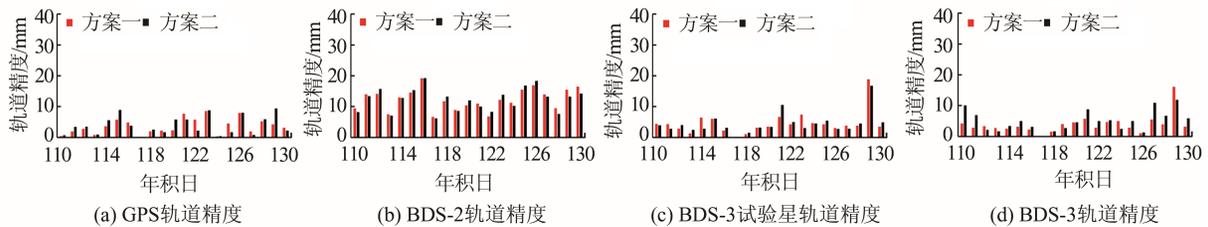


图 4 基于 B1C/B2a 频率(BDS-3)不同 ISB 参数模式下精密定轨精度相对变化

Fig. 4 Accuracy Variation of Precise Orbit Determination Based on Different ISB Models Under B1C/B2a

通过图 3 与图 4 对比实验结果可知:(1)基于 B1I/B3I 定轨过程中采用不同的 ISB 估计模式,GPS 轨道精度受影响较小,而 BDS-2 受影响较大,同时,定轨过程中不考虑 ISB 参数对轨道的影响较设置为为一类参数大。BDS-3 轨道受影响较小,这主要是可跟踪 BDS-3 的测站有限,观测数据对轨道精度影响较 ISB 参数明显。(2)定轨方案中 BDS-3 采用 B1C/B2a 进行 GPS/BDS-2/BDS-3/BDS-3e 联合定轨,实验结果表明,两种方案对 GPS/BDS-2/BDS-3e 轨道影响无明显差异。而对于 BDS-3,在不估计 ISB 参数情况下轨道影响小于估计 ISB 情况下的轨道,同样是由于可获得观测数据较少导致在待估参数增加的情况下整体参数精度降低,其具体原因有待进一步分析。上述实验间接说明引入新信号、新卫星,联合定轨策略中需要考虑北斗各类卫星之间的系统偏差参数。

### 2.3 联合定轨 ISB 参数建模分析

为分析联合定轨过程中 ISB 参数特性,利用 §1.2 中提出的顾及前后历元相关性的 ISB 解算模型,进行连续两周(2018 年年积日第 111 天至第 124 天)的联合定轨实验。定轨过程中将测站坐标、地球自转参数以及对流层等参数施加强约束,以降低其他参数对 ISB 解算的影响;实验中 ISB 以 30 min 历元间隔分段估计。定轨方案中采用 GPS+BDS-2、GPS+BDS-3、GPS+BDS-3e 解算北斗各类卫星与 GPS 之间的系统偏差参数。实验中 BDS-2 与 BDS-3e 采用 B1I/B3I 观测数据,BDS-3 同时对 B1C/B2a 进行实验分析。不同测站联合定轨 ISB 序列及其拟合曲线如图 5 所示。

由于 ISB 参数存在与接收机类型相关的分群现象,图 5 中选取具有代表性的测站画出了其随历元变化的趋势(由于 B1C/B2a 数据质量问题,

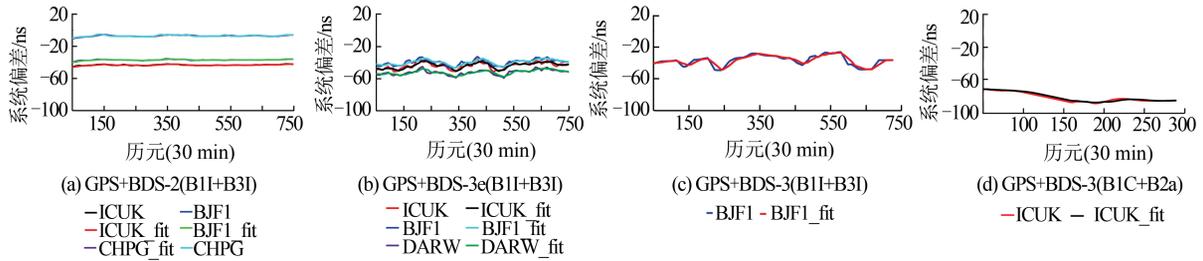


图5 不同测站联合定轨ISB序列及其拟合曲线

Fig. 5 ISB Series and Its Corresponding Fit Results of Different Stations Based on Combined Orbit Determination

实验中只选取了连续10 d的结果)。需要注意的是,由于无法获取ISB参数相应的参考值,尚不能对ISB参数估计精度作出对比分析,本文只讨论利用估计出的ISB时间序列建模的效果。

图5中,估计出的ISB时间序列结果表明:(1)不同频率、不同类型卫星估计出的ISB存在明显差异,这主要是由于卫星类型和频率之间差异导致的;(2)ISB参数存在明显周期特性,且同类卫星、同频率所估计出的ISB具有近似的周期和振幅。因此,针对联合定轨过程中不同类型北斗间偏差归为一类参数且定轨弧段内作为天稳定参数处理显然不合理,有必要针对不同接收机、不同卫星类型以及不同观测信号构建ISB时间序列模型。

为分析ISB变化趋势,基于接收机和卫星类型,采用文献[31]提出的函数模型,对不同接收机、卫星建立相应的ISB序列函数模型,即:

$$I = A \times t^2 + B \times t + C + \sum_{i=1}^n (D_i \times \cos(\frac{2\pi t}{P_i}) + E_i \times \sin(\frac{2\pi t}{P_i})) \quad (28)$$

式中, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为趋势项系数; $D_i$ 、 $E_i$ 为周期项振幅; $P_i$ 为周期; $t$ 为相对起始时刻的时间间隔。各系数可通过最小二乘求解,周期则利用谱分析获得。

为验证上述ISB建模的可行性,利用式(28)分析不同联合定轨方案中不同测站、不同类型卫星对应的ISB曲线,如图5所示。与之类似,由于同一类型卫星对应的ISB具有分群现象且趋势基本一致,图5中仅绘出了具有代表性结果。同时,表3中具体给出了对应于图5中各测站ISB拟合残差的最大值、最小值、平均值与均方根误差(root mean square error, RMSE)。

由表3中的实验结果可知,利用式(28)进行ISB建模,利用B1I/B3I观测数据解算出的BDS-2偏差参数建模,其误差可忽略不计;但BDS-3误

差明显较大,无法实现准确建模。综上,针对BDS-2解算的ISB参数可较好地利用模型(28)进行描述,其RMSE优于0.25 ns;而BDS-3则受iGMAS测站受限等因素共同影响,出现个别测站拟合残差较大的情况,整体精度优于1.4 ns。通过对联合定轨中ISB参数准确建模,在时效性与精度严格要求的超快速轨道定轨中,可加入短期预报的ISB参数约束,提高超快速联合定轨精度。

表3 各测站ISB拟合残差统计/ns

Tab. 3 Fitting Residuals of ISB of Different Stations /ns

频率	卫星	测站	最大值	最小值	平均值	RMSE
GPS+BDS-2		ICUK	0.608	0.001	0.013	0.008
		BJF1	0.410	0.000	0.301	0.012
		CHPG	0.809	0.002	0.286	0.224
B1I/B3I	GPS+BDS-3	ICUK	6.544	-0.005	0.298	1.204
		BJF1	4.309	0.022	0.449	0.642
		DARW	5.251	-0.014	0.155	0.993
GPS+BDS-3e	GPS+BDS-3e	BJF1	5.694	0.003	1.396	1.311
		B1C/B2a	GPS+BDS-3	ICUK	2.334	-0.102

## 2.4 超快速联合定轨实验

超快速轨道作为实时或近实时应用的重要产品,其精度与时效性是参数解算的核心指标。为顾及轨道参数解算的时效性,减少观测方程中参数,降低法方程维数,以及增加参数解算间隔等策略已探索应用。本文对GPS/BDS-2/BDS-3联合超快速轨道确定中ISB参数进行约束处理,以降低ISB参数对轨道的影响,提高参数解算的可靠性与精度。

首先,基于提出的改进的联合定轨ISB解算模型,对解算的ISB序列进行准确建模与短期预报;其次,将预报的ISB参数作为约束条件加入超快速联合定轨中,实现顾及超快速轨道时效性与精度的指标。为验证超快速联合定轨中以预报

ISB 参数为约束条件的可行性,利用与§2.1 相同的实验数据,设计了超快速联合定轨实验,具体实验步骤如图 6 所示。

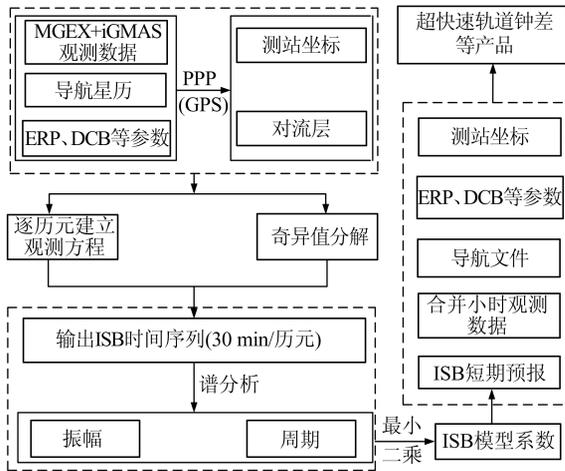


图 6 基于预报 ISB 的超快速轨道确定流程

Fig. 6 Flowchart of Ultra-Rapid Orbit Determination Based on Predicted ISB

基于图 6 的超快速轨道定轨流程,进行连续 10 d(2018 年年积日第 110 天至第 119 天)定轨实验,分析基于实时估计与约束预报 ISB 参数对定轨结果的影响。为充分分析不同 ISB 处理模型,设计了两套定轨实验方案。方案 1:基于 3 天定轨弧段,分别利用实时估计(BDS-2 与 BDS-3 相对于 GPS 设置不同的 ISB 参数)与约束预报的 ISB 参数进行 GPS+BDS-2+BDS-3 联合定轨,通过对比一天的重叠弧段分析 ISB 参数处理效果,其轨道精度如图 7(a)所示。方案 2:如图 6 所示,基于超快速定轨策略,分别约束预报的 ISB 与实时估计 ISB 参数进行超快速单天弧段联合轨道确定,对比 18 h 重叠弧段轨道不符值,其轨道精度如图 7(b)所示。

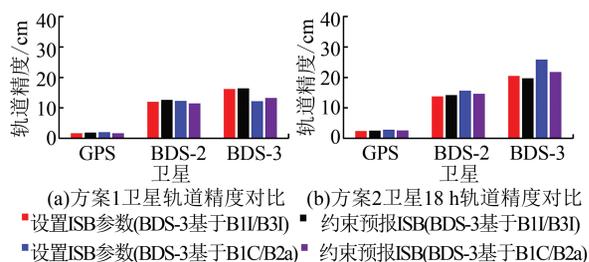


图 7 方案 1 与方案 2 轨道重叠弧段(1D RMSE)对比  
Fig. 7 Accuracies Comparison of Overlapping Orbit Based on Scheme 1 and Scheme 2 (1D RMSE)

上述两组对比实验分析了实时估计 ISB 参数与约束预报 ISB 对不同定轨模式(3 天弧段与单天弧段)影响。图 7 实验结果表明,观测数据充足

的条件下(方案 1),采用实时估计 ISB 参数的定轨策略获得的轨道重叠弧段精度优于约束预报 ISB 的定轨结果;而在观测数据较少条件下(方案 2),预报单天 ISB 参数作为约束条件带入定轨中获得的超快速轨道重叠弧段精度略优于实时估计 ISB 参数方案结果。上述两组实验方案间接地证明了超快速联合定轨过程中,采用约束预报 ISB 参数方案,可一定程度上改善定轨的时效性与精度。为更具体描述轨道实验结果,表 4 统计了各方案所对应 ISB 处理模式以及定轨精度。

表 4 不同定轨方案轨道重叠弧段不符值(1D RMSE)/cm  
Tab. 4 Accuracy of Orbit Overlapping (1D RMSE) Based on Different Schemes /cm

卫星	方案	BDS-3/BDS-2(B1I/B3I)/GPS(L1L2)		BDS-2(B1I/B3I)/BDS-3(B1C/B2a)/GPS(L1L2)	
		ISB 估计	ISB 预报	ISB 估计	ISB 预报
GPS	方案 1	1.6	1.8	1.9	1.6
	方案 2	2.3	2.4	2.7	2.5
BDS-2	方案 1	11.9	12.5	12.2	11.4
	方案 2	13.7	14.1	15.5	14.5
BDS-3	方案 1	16.1	16.3	12.1	13.2
	方案 2	20.4	19.6	25.8	21.7

从表 4 统计结果中可知,不同定轨方案以及 ISB 处理策略中,GPS 轨道精度受影响较小,原因是 GPS 观测数据较充足,不同的定轨模式无明显差别。BDS-2 超快速轨道精度变化为 -0.4~1.0 cm。BDS-3 轨道精度变化如下:方案 1 中采用 B1I/B3I 观测数据,其轨道重叠弧段不符值无明显差别;而采用 B1C/B2a 观测数据时,约束预报 ISB 参数进行联合定轨进一步降低轨道精度达 1.1 cm。需要注意的是,方案 2 中约束预报 ISB 参数的超快速定轨精度明显优于设置 ISB 参数实时估计策略,其精度提升 0.8~4.1 cm,主要是由于可跟踪 BDS-3 测站较少,超快速定轨过程中无法准确求解各参数,引入高精度预报的 ISB 参数间接提高了轨道等其他参数解算精度。

综上,在 GPS/BDS-2/BDS-3 联合定轨过程中有必要考虑系统偏差;且在超快速轨道确定过程中,有必要采用约束短期预报 ISB 参数策略。

### 3 结 语

本文针对 BDS-2 与 BDS-3 共存以及卫星间

存在差异的现状,研究联合定轨中系统偏差参数处理策略。连续21 d联合定轨 ISB 参数解算结果表明,ISB 参数存在以接收机类型分群现象,且 BDS-2 与 BDS-3 间存在明显的偏差,尤其是 BDS-3 新信号。

为提高 ISB 参数估计的准确性与可靠性,本文提出了一种改进的联合定轨 ISB 参数估计模型,即通过奇异值分解与历元间差分,充分保留相邻历元有益的观测信息,实现观测数据充分利用。联合定轨实验结果显示,在 B1I/B3I 观测信号条件下,BDS-2/BDS-3 不存在明显的系统偏差。而当 BDS-3 采用 B1C/B2a 观测信号则存在较大的偏差,有必要对 GPS/BDS-2/BDS-3 联合定轨过程中 ISB 参数进行精化处理。

为分析 ISB 参数对联合定轨的影响,首先,基于参数之间的相关性分析发现 ISB 参数与北斗轨道各参数之间较 GPS 轨道参数相关性系数高两个量级;通过 3 组联合定轨对比实验验证了引入 BDS-3 新信号、新卫星条件下,联合定轨中需要对 BDS-2/BDS-3 间的偏差具体考虑。然后,基于估计的 ISB 时间序列,通过谱分析与最小二乘构建 ISB 模型,实现对 ISB 时间序列建模分析。最后,基于构建的 ISB 模型,通过将短期预报的 ISB 参数作为约束条件带入超快速联合定轨模型中,实现顾及超快速轨道时效性与精度的定轨策略。

通过两组定轨对比方案发现,GPS 轨道受 ISB 参数影响较小,而北斗受影响较为明显。通过约束预报的 ISB 参数,超快速定轨结果显示可分别提高 BDS-2 与 BDS-3 轨道重叠弧段不符值  $-0.4 \sim 1.0$  cm 与  $0.8 \sim 4.1$  cm。

综上,在 GPS/BDS-2/BDS-3 联合定轨过程中有必要考虑 BDS-2/BDS-3 间系统偏差,且在超快速轨道确定过程中采用约束短期预报 ISB 参数是有效的策略之一。

致谢:感谢江苏省双创团队项目支持和国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)提供的数据产品。

### 参 考 文 献

- [1] China Satellite Navigation Project Center. Compass/BeiDou Navigation Satellite System Development [R]. Beijing: China Satellite Navigation Project Center, 2009
- [2] Yang Y, Li J, Xu J, et al. Contribution of the Compass Satellite Navigation System to Global PNT Users[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2 813-2 819
- [3] Yang Y. Performance Analysis of BDS-3 Demonstration System [C]. International Symposium on GNSS, Hong Kong, China, 2017
- [4] Zhou S, Hu X, Wu B, et al. Orbit Determination and Time Synchronization for a GEO/IGSO Satellite Navigation Constellation with Regional Tracking Network [J]. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(6): 1 089-1 097
- [5] Zhao Q, Wang C, Guo J, et al. Enhanced Orbit Determination for BeiDou Satellites with FengYun-3C Onboard GNSS Data[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1 179-1 190
- [6] Guo J, Zhao Q. Analysis of Precise Orbit Determination for BeiDou Satellite During Yaw Maneuvers [C]. The 5th China Satellite Navigation Conference, Nanjing, China, 2014
- [7] Steigenberger P, Hugentobler U, Hauschild A, et al. Orbit and Clock Analysis of Compass GEO and IGSO Satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(6): 515-525
- [8] Dai X, Ge M, Lou Y, et al. Estimating the Yaw Attitude of BDS IGSO and MEO Satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(10): 1 005-1 018
- [9] Shi C, Zhao Q, Min L, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites with Precise Positioning [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1 079-1 086
- [10] Wang Q, Zhang K, Wu S, et al. A Method for Identification of Optimal Minimum Number of Multi-GNSS Tracking Stations for Ultra-Rapid Orbit and ERP Determination [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(9): 2 877-2 888
- [11] Ge M, Zhang H, Jia X, et al. What is Achievable with the Current Compass Constellation? [J]. *GPS World*, 2012, 23(11): 331-339
- [12] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial Assessment of the COMPASS/BeiDou-2 Regional Navigation Satellite System [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 211-222
- [13] Tan B, Yuan Y, Wen M, et al. Initial Results of the Precise Orbit Determination for the New-Generation BeiDou Satellites (BeiDou-3) Based on the iGMAS Network [J]. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) International Journal of Geo-information*, 2016, 5(11), DOI:10.3390/ijgi5110196
- [14] Zhao Q, Wang C, Guo J, et al. Precise Orbit and Clock Determination for BeiDou-3 Experimental Satellites with Yaw Attitude Analysis [J]. *GPS So-*

- lutions, 2018, 22(1), DOI:org/10.1007/s10291-017-0673-y
- [15] Ren X, Yang Y, Zhu J, et al. Orbit Determination of the Next-Generation BeiDou Satellites with Inter-satellite Link Measurements and a Priori Orbit Constraints[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(10):2155-2165
- [16] Wen Y, Zhu J, Zhi L, et al. Simulation and Analysis of Integrated Orbit Determination of Satellites Constellation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(1):155-163
- [17] Li X, Yuan Y, Zhu Y, et al. Precise Orbit Determination for BDS3 Experimental Satellites Using iGMAS and MGEX Tracking Networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1):103-117
- [18] Zeng A, Yang Y, Ming F, et al. BDS-GPS Inter-system Bias of Code Observation and Its Preliminary Analysis[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2):1573-1581
- [19] Odijk D, Teunissen P. Characterization of Between-Receiver GPS-Galileo Inter-system Biases and Their Effect on Mixed Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4):521-533
- [20] Lou Y, Zheng F, Gu S, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning with Raw Single-Frequency and Dual-Frequency Measurement Models[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4):849-862
- [21] Paziewski J, Wielgosz P. Accounting for GALILEO-GPS Inter-System Biases in Precise Satellite Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(1):81-93
- [22] Nadarajah N, Teunissen P, Raziq N. BeiDou Inter-Satellite-Type Bias Evaluation and Calibration for Mixed Receiver Attitude Determination [J]. *Sensors*, 2013, 13(7):9435-9463
- [23] Rabbou M, EI-Rabbany A. Performance Analysis of Precise Point Positioning Using Multi-constellation GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou [J]. *Survey Review*, 2017, 49(352):39-50
- [24] Liu T, Yuan Y, Zhang B, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning (MGPPP) Using Raw Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(10):253-268
- [25] Chen J, Zhang Y, Wang J, et al. A Simplified and Unified Model of Multi-GNSS Precise Point Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1):125-134
- [26] Hu C, Wang Q, Wang Z, et al. New-Generation BeiDou (BDS-3) Experimental Satellite Precise Orbit Determination with an Improved Cycle-Slip Detection and Repair Algorithm [J]. *Sensors*, 2018, 18(5), DOI:10.3390/s18051402
- [27] Hu Chao, Wang Qianxin, Wang Zhongyuan, et al. An Optimal Stations Selected Model Based on the GDOP Value of Observation Equation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6):838-844(胡超,王潜心,王中元,等.一种基于观测方程GDOP值的优化选站模型[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2017,42(6):838-844)
- [28] Hu Chao, Wang Qianxin, Mao Ya. An Improved Model for the Observed GNSS Ultra-Rapid Orbit Based on DOP Values [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1):28-37(胡超,王潜心,毛亚.一种基于DOP值的GNSS超快速观测轨道精化模型[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2020,45(1):28-37)
- [29] Luo Fei. Research on GNSS Position-Domain Carrier-Smooth-Code Technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019(骆飞.GNSS位置域载波平滑伪距技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019)
- [30] Akaike H. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle [C]. The Second International Symposium on Information Theory, Budapest, Hungarian, 1973
- [31] Jiang N, Xu Y, Xu T, et al. GPS/BDS Short-Term ISB Modelling and Prediction [J]. *GPS Solutions*, 2015, 21(1), DOI:10.1007/s10291-015-0513-x

## An Improved Model for Inter-System Bias Estimation Based on BDS-2/BDS-3 Combined Precise Orbit Determination

HU Chao<sup>1,2,3</sup> WANG Zhongyuan<sup>1,3</sup> WANG Qianxin<sup>1,3</sup> RAO Pengwen<sup>1,3</sup>

1 Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

3 School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract: Objectives:** To integrate processing of BDS-2 and BDS-3 satellites observations and to conduct the deeply merged strategy for enhancing the parameter solutions, the differences between BDS-2 and BDS-3 should be considered and analyzed. **Methods:** Given the differences of BDS-2 and BDS-3 satellites, to fully utilize and fuse the observations, the inter-system bias (ISB) model of BDS-2/BDS-3 combined precise orbit determination is analyzed and improved. Firstly, to improve the accuracy and reliability of ISB, the singular value decomposition is introduced to extract the observation information of adjacent epoch. Secondly, the characteristics of ISB are analyzed, which indicates that the ISBs are significantly presented and related with the types of receivers based on the new signals of BDS-3 and BDS-2. Then, the correlations between ISB and orbit parameters are analyzed; the results suggest that the BeiDou orbit accuracy is affected more significantly than that of GPS. Finally, based on the estimated ISB series, the short-term prediction of ISB model is established by spectral analysis, which is inserted into the ultra-rapid precise orbit determination. **Results:** With ultra-rapid orbit determination experiments, the proposed ISB prediction and estimation strategies can improve  $-0.4 - 1.0$  cm and  $0.8 - 4.1$  cm for BDS-2 and BDS-3 orbit one-day overlapping, respectively. **Conclusions:** Therefore, it is meaningful for improving the BDS-2/BDS-3 ultra-rapid combined precise orbit determination with the improved ISB estimation and prediction model.

**Key words:** BDS-2/BDS-3 combined orbit determination; inter-system bias(ISB); singular value decomposition; short-term prediction; ultra-rapid precise orbit

**First author:** HU Chao, PhD, specializes in the theories and methods of GNSS orbit determination. E-mail: chaohu2014gnss@163.com

**Corresponding author:** WANG Zhongyuan, PhD, associate professor. E-mail: wzy@cumt.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41874039); the Jiangsu Natural Science Foundation (BK20181361); the Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province(SJCX19\_0906); the Natural Science Foundation of Anhui Colleges (KJ2020A0310).

**引文格式:** HU Chao, WANG Zhongyuan, WANG Qianxin, et al. An Improved Model for Inter-System Bias Estimation Based on BDS-2/BDS-3 Combined Precise Orbit Determination[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(3): 360-370. DOI: 10.13203/j.whugis20190132(胡超,王中元,王潜心,等.一种改进的BDS-2/BDS-3联合精密定轨系统偏差处理模型[J].武汉大学学报·信息科学版,2021,46(3):360-370.DOI:10.13203/j.whugis20190132)