

多 GNSS 系统精密定轨 ISB/IFB 估计及特性分析

党亚民¹ 张龙平¹ 陈俊勇¹

1 中国测绘科学研究院,北京,100830

摘 要:多全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)系统联合精密定轨需要考虑系统间及频率间偏差的影响。推导了多 GNSS 定轨系统间偏差(inter system bias, ISB)/频率间偏差(inter frequency bias, IFB)解算模型,以 GPS 系统硬件延迟为基准,给出了一种消除 ISB/IFB 秩亏的约束方法。试验数据结果表明,各系统 ISB/IFB 均表现出良好的稳定性及同一系统各卫星时间序列的一致性,BDS ISB 的标准差为 0.36 ns, Galileo ISB 的标准差为 0.18 ns, GLONASS IFB 的标准差为 0.51 ns;在接收机类型相同的情况下,不同跟踪站的 ISB 比较接近,但仍可达到 ns 级差异;GLONASS IFB 在同一跟踪站相同频道号的卫星及不同跟踪站相同频道号卫星均表现出了良好的一致性。

关键词:GNSS;基准统一;精密定轨;系统间偏差;频率间偏差

中图分类号:P228 **文献标志码:**A

全球卫星导航定位已经进入多系统时代^[1]。北斗三号新增了新信号 B1C 和 B2a,其中 B1C 与全球定位系统(Global Positioning System, GPS) L1 及 Galileo E1 频率一致, B2a 与 GPS L5 及 Galileo E5a 频率一致,以便北斗卫星导航系统(BDS)/GPS/Galileo/GLONASS 等导航系统兼容互操作^[2]。但由于各系统信号结构、体制不同,使得观测值在卫星端及接收机端信号延迟存在差异^[3],表现为系统间偏差(inter system bias, ISB)以及频率间偏差(inter frequency bias, IFB)。

目前国内外学者对多全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS) ISB/IFB 参数估计及分析进行了大量的研究^[4-8]。戴小蕾^[9]采用 MGEX(the Multi-GNSS Experiment)跟踪网数据,顾及 BDS/GLONASS 的 ISB/IFB,实现了统一基准框架下的多系统融合定轨; Montenbruck 等^[10]分析并验证了 GNSS ISB 与接收机硬件的信号时延关系; Tegedor 等^[11]对 Galileo、BDS 与 GPS 联合定位中 ISB 参数进行实验,发现其与接收机类型相关,不同类型接收机之间 GPS/BDS 的 ISB 差异可超过 100 ns; Dach 等^[12]研究了 GNSS 系统时差、硬件延迟、GLONASS 卫星之间的频间差及其特性。多 GNSS 系统精密轨道是位置服务的核心

基准产品之一^[13],需要对 ISB、IFB 进行参数估计。

本文采用“一步法”进行 BDS/GPS/Galileo/GLONASS 融合精密定轨^[11],即在同一平差模型解算多系统轨道及其他参数,推导了多 GNSS 系统精密定轨 ISB/IFB 解算模型,并分析了各系统 ISB/IFB 的特性。

1 多 GNSS 系统精密定轨观测模型

GNSS 精密定轨通常采用非差无电离层组合观测值进行数据处理^[14]:

$$PC_r^s = (f_1^2 \cdot P_1 - f_2^2 \cdot P_2) / (f_1^2 - f_2^2) = \rho_r^s - c \cdot \delta t^s + c \cdot \delta t_r + c \cdot (d_r - d^s) + T^r + \epsilon_r^s \quad (1)$$

$$LC_r^s = (f_1^2 \cdot L_1 - f_2^2 \cdot L_2) / (f_1^2 - f_2^2) = \rho_r^s - c \cdot \delta t^s + c \cdot \delta t_r + \lambda \cdot (b_r - b^s) + \lambda \cdot N_r^s + T^r + \epsilon_r^s \quad (2)$$

式中, f 为各频点频率; r 表示跟踪站; s 表示卫星;PC 表示伪距无电离层组合观测值;LC 表示载波无电离层组合观测值; ρ_r^s 为卫星与跟踪站的几何距离; δt^s 为卫星钟差; δt_r 为接收机钟差; c 是光速; T^r 为对流层湿延迟量; N_r^s 为模糊度参数; ϵ_r^s 为载波观测噪声; b_r 、 b^s 分别为接收机端和卫星的载波相位延迟; d_r 、 d^s 分别为接收机端和卫星端

的码硬件延迟; e_r^s 为伪距观测噪声; P_1 、 P_2 为原始伪距观测值; L_1 、 L_2 为原始载波观测值。

线性化后可建立如下误差方程:

$$\mathbf{X} = [\mathrm{d}X^s \quad \mathrm{d}X_r \quad \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} \quad \mathrm{d}T_r \quad \mathrm{d}t_r \quad \mathrm{d}t^s \quad \delta \mathrm{d}_r \quad \delta \mathrm{d}^s \quad \delta b_r \quad \delta b^s \quad N_r^s]$$

(4)

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -u_r^s & u_r^s & u_{\mathrm{erp}} & m_{\mathrm{wet}}(E) & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -u_r^s & u_r^s & u_{\mathrm{erp}} & m_{\mathrm{wet}}(E) & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & \lambda \end{bmatrix}$$

(5)

\mathbf{L}_{PC} 和 \mathbf{L}_{LC} 分别是伪距和相位 OMC(observation minus computed); \mathbf{V}_{PC} 和 \mathbf{V}_{LC} 分别为伪距和载波残差;待估参数依次为轨道初始状态参数改正(轨道位置、速度、光压模型)、跟踪站位置改正、地球自转参数改正、对流层参数改正、接收机钟差改正、卫星钟差改正、接收机码硬件延迟、卫星码硬件延迟、接收机相位延迟、卫星相位延迟以及模糊度^[15]; \mathbf{X} 表示待估参数矩阵; \mathbf{B} 表示待估参数系数矩阵; u_r^s 是跟踪站位置参数系数; u_{erp} 是地球自转参数系数; m_{wet} 是对流层映射函数; λ 是波长。不同 GNSS 系统的伪距和相位观测值在卫星端和接收机端的信号延迟量存在差异。对于 GPS/BDS/Galileo 系统,在多系统数据处理时需要估计系统间偏差,而对于 GLONASS 系统,由于采用频分多址技术,需要估计频率间偏差。

2 精密定轨 ISB/IFB 估计

接收机码硬件延迟、接收机相位延迟、卫星码硬件延迟、卫星相位延迟形成了多 GNSS 系统硬件延迟。通过式(5)可知,同时估计接收机钟差、卫星钟差、接收机码硬件延迟、接收机相位延迟、卫星码硬件延迟、卫星相位延迟存在方程秩亏问

$$\begin{cases} v_{r,\mathrm{PC}}^{G,s} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^G + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r - \tilde{\mathrm{d}}t^{G,s}(t) + l_{r,\mathrm{PC}}^{G,s}(t) \\ v_{r,\mathrm{LC}}^{G,s} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^G + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r - \tilde{\mathrm{d}}t^{G,s}(t) + \lambda \tilde{N}_{r,\mathrm{LC}}^{G,s} + l_{r,\mathrm{LC}}^{G,s}(t) \\ v_{r,\mathrm{PC}}^{C,k} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^C + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r + \mathrm{ISB}^{C-G} - \tilde{\mathrm{d}}t^{C,k}(t) + l_{r,\mathrm{PC}}^{C,k}(t) \\ v_{r,\mathrm{LC}}^{C,k} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^C + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r - \tilde{\mathrm{d}}t^{C,m}(t) + \lambda \tilde{N}_{r,\mathrm{LC}}^{C,k} + l_{r,\mathrm{LC}}^{C,k}(t) \\ v_{r,\mathrm{PC}}^{R,1} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^{R,1} + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r^1 + \mathrm{IFB}^{R-G,1} - \tilde{\mathrm{d}}t^{R,1}(t) + l_{r,\mathrm{PC}}^{R,1}(t) \\ v_{r,\mathrm{LC}}^{R,1} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^{R,1} + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r^1 - \tilde{\mathrm{d}}t^{R,1}(t) + \lambda \tilde{N}_{r,\mathrm{LC}}^{R,1} + l_{r,\mathrm{LC}}^{R,1}(t) \\ \vdots \\ v_{r,\mathrm{PC}}^{R,g_{\mathrm{all}}} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^{R,g_{\mathrm{all}}} + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r^{g_{\mathrm{all}}} + \mathrm{IFB}^{R-G,g_{\mathrm{all}}} - \tilde{\mathrm{d}}t^{R,g_{\mathrm{all}}}(t) + l_{r,\mathrm{PC}}^{R,g_{\mathrm{all}}}(t) \\ v_{r,\mathrm{LC}}^{R,g_{\mathrm{all}}} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^{R,g_{\mathrm{all}}} + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r^{g_{\mathrm{all}}} - \tilde{\mathrm{d}}t^{R,g_{\mathrm{all}}}(t) + \lambda \tilde{N}_{r,\mathrm{LC}}^{R,g_{\mathrm{all}}} + l_{r,\mathrm{LC}}^{R,g_{\mathrm{all}}}(t) \\ v_{r,\mathrm{PC}}^{E,n} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^E + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r + \mathrm{ISB}^{E-G} - \tilde{\mathrm{d}}t^{E,n}(t) + l_{r,\mathrm{PC}}^{E,n}(t) \\ v_{r,\mathrm{LC}}^{E,n} = -u_r^s \cdot \mathrm{d}X^E + u_r^s \cdot \mathrm{d}X_r + u_{\mathrm{erp}} \cdot \mathrm{d}X_{\mathrm{erp}} + m_{\mathrm{wet}}(E) \cdot \mathrm{d}T_r(t) + \mathrm{d}t_r - \tilde{\mathrm{d}}t^{E,n}(t) + \lambda \tilde{N}_{r,\mathrm{LC}}^{E,n} + l_{r,\mathrm{LC}}^{E,n}(t) \end{cases}$$

(7)

式中, $\tilde{\mathrm{d}}t$ 是吸收卫星码硬件延迟后的卫星钟差改正值; \tilde{N} 是吸收卫星和接收机相位延迟后的模糊

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} - \mathbf{L}$$

(3)

式中, $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\mathrm{PC}} \\ \mathbf{V}_{\mathrm{LC}} \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\mathrm{PC}} \\ \mathbf{L}_{\mathrm{LC}} \end{bmatrix}$$
;

题,需要进行部分参数的合并后引入基准约束。

GNSS 精密定轨过程从数学意义上可以认为卫星码硬件延迟被卫星钟差吸收,卫星和接收机相位延迟被模糊度吸收^[16],此时,多 GNSS 系统延迟仅包含接收机码硬件延迟。实际数据处理中,同一接收机解算多套接收机钟差并不完全合理,在多 GNSS 系统精密定轨中需要进行系统基准统一。考虑到 GPS 系统较为完善和稳定,以 GPS 系统作为参考,引入零均值基准作为约束条件^[17],可分别将 BDS、Galileo、GLONASS 相对于 GPS 的系统/频率间偏差定义为:

$$\begin{cases} \mathrm{ISB}^{CG} = \delta \mathrm{d}_r^C - \delta \mathrm{d}_r^G \\ \mathrm{ISB}^{EG} = \delta \mathrm{d}_r^E - \delta \mathrm{d}_r^G \\ \mathrm{IFB}^{RG,1} = \delta \mathrm{d}_r^R - \delta \mathrm{d}_r^G \\ \mathrm{IFB}^{RG,2} = \delta \mathrm{d}_r^R - \delta \mathrm{d}_r^G \\ \vdots \\ \mathrm{IFB}^{RG,g_{\mathrm{all}}} = \delta \mathrm{d}_r^R - \delta \mathrm{d}_r^G \end{cases}$$

(6)

式中, ISB^{CG} 、 ISB^{EG} 是 BDS、Galileo 系统相对于 GPS 系统的系统间偏差; $\mathrm{IFB}^{RG,i}$ 是*i*颗 GLONASS 卫星相对于 GPS 系统的频率间偏差; g_{all} 是 GLONASS 卫星数。

将式(6)代入式(3),可得:

度改正值; v 是伪距和载波残差; l 是伪距和相位 OMC。此时,对于 ISB 和 IFB 参数,每个跟踪站

BDS、Galileo 系统分别需要估计 1 个参数,而 GLONASS 需估计 g_all 个参数,因此 n 个跟踪站共需要解算 $(g_all+2) \times n$ 个参数。为消除式 (7) 的秩亏问题^[17],估计 ISB 参数时,所有跟踪站接收机端各系统对 GPS 系统的 ISB 和为零;估计 IFB 参数时,所有跟踪站接收机端对每颗 GLONASS 卫星的 IFB 和为零,因此构建如下基准约束方程:

$$\begin{cases} ISB_1^{CG} + ISB_2^{CG} + \cdots + ISB_n^{CG} = 0 \\ ISB_1^{EG} + ISB_2^{EG} + \cdots + ISB_n^{EG} = 0 \\ IFB_1^{RG,1} + IFB_2^{RG,1} + \cdots + IFB_n^{RG,1} = 0 \\ IFB_1^{RG,2} + IFB_2^{RG,2} + \cdots + IFB_n^{RG,2} = 0 \\ IFB_1^{RG,3} + IFB_2^{RG,3} + \cdots + IFB_n^{RG,3} = 0 \\ \vdots \\ IFB_1^{RG,k} + IFB_2^{RG,k} + \cdots + IFB_n^{RG,k} = 0 \end{cases}$$

(8)

表 1 多系统精密定轨策略

Tab. 1 The Strategy of Multi-system Precise Orbit Determination

类别		策略	类别		策略
观测值	LC+PC	无电离层组合观测值	参考钟		固定一个接收机钟
先验约束		伪距 1 m,载波 0.01 周	测站坐标		SNX 文件+精密单点定位结果
截止高度角		7°	对流层		Saastmoine 模型+过程噪声
观测值加权		$p=1, e>30^{\circ}; p=4\sin^2e, e\leq 30^{\circ}$	相位中心变化		iGMAS 推荐值
天线相位缠绕		模型改正	接收机钟差		伪距估计+白噪声
定轨弧长		3 d			GEO(geostationary earth orbit)卫星不固定
			模糊度		IGSO(inclined geosynchronous orbit)/ MEO(medium earth orbit)卫星固定

图 2 所示,具体分析跟踪站的 ISB 天变化,45 d 序列的 ISB 变化稳定,并且跟踪站 ISB 变化趋势基本一致(同一基准)^[18]。统计每个跟踪站 BDS ISB 的标准差(standard deviation, STD)最大为 LAUT 站 0.57 ns,最小为 HARB 站 0.28 ns,平均为 0.36 ns。

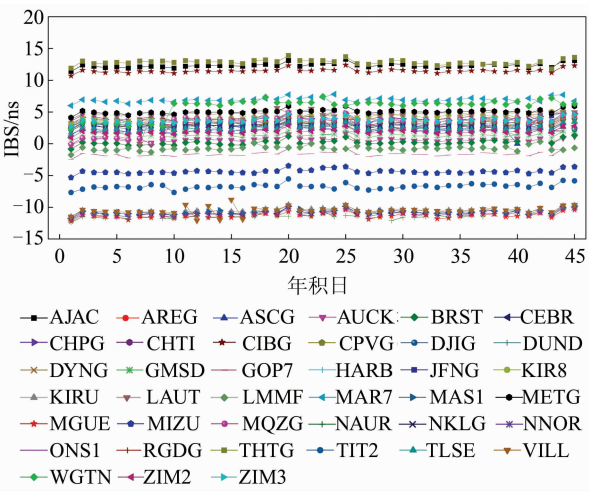


图 1 跟踪站 BDS ISB 序列
Fig. 1 BDS ISB Sequence of Monitoring Stations

统计了 6 类型号接收机 ISB 估值的平均值,

3 实例分析

采用 2018 年 001 至 045 天 MGEX 站数据,进行了多 GNSS 系统定轨测试,定轨策略见表 1。采用 GPS 为基准的零均值约束。即对于 ISB,每个跟踪站每个系统增加一个参数;而对于 IFB,每个跟踪站每个卫星增加一个参数,以评估精密定轨中不同接收机各系统 ISB/IFB 特性。

3.1 BDS ISB 分析

图 1 中所有跟踪站 BDS 的 ISB 数值在 -13 ~ 13 ns 之间,即 -3.9 ~ 3.9 m,但每个跟踪站在 45 d 内的变化量很小,并且时间序列具有很好的一致性,由于没有经过基准平均,各测站存在明显的分层,因此绘制同一层 5 个跟踪站的序列,如

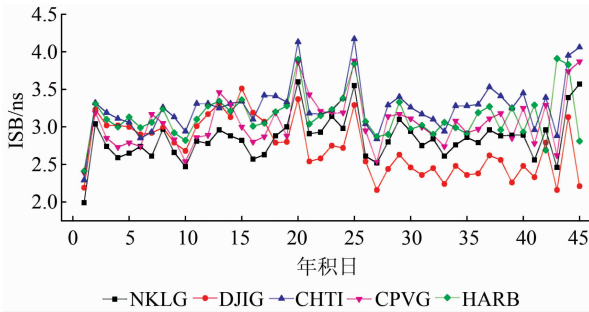


图 2 同一层 BDS ISB 序列
Fig. 2 BDS ISB Sequence of the Same Layer of Monitoring Stations

如图 3 所示。同一类型的接收机对应跟踪站 ISB 相对较为接近,如图 4、图 5 所示。其中 Leica GR25 接收机的跟踪站 ISB 差异最小,在 1 ns 以内;而 TRIMBLE NET R9 接收机中 GOP7 站和 MIZU 站出现了负值,发现 GOP7 站采用 LE-IAR25. R4 天线,MIZU 站采用 JAV_RINGANT _G3T 天线,该接收机的其他跟踪站采用 TRM59800.00,因此 BDS ISB 可能还与跟踪站采用的天线类型有关。

3.2 Galileo ISB 分析

图 4 中,所有跟踪站的 Galileo ISB 参数值在

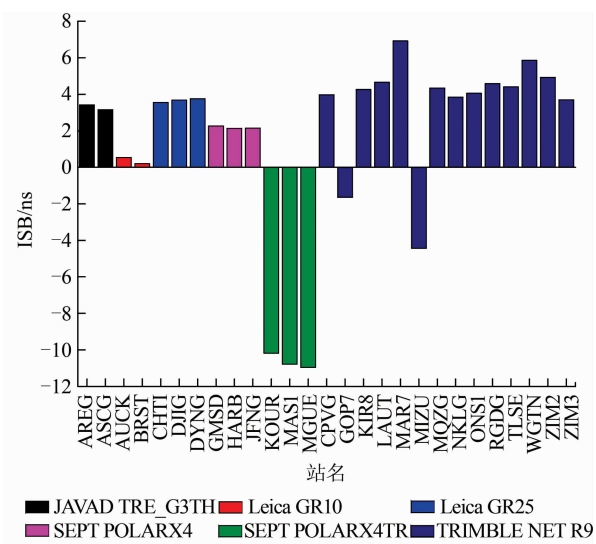


图 3 不同接收机类型的 BDS ISB 统计
Fig. 3 BDS ISB Statistics for Different Types Receivers

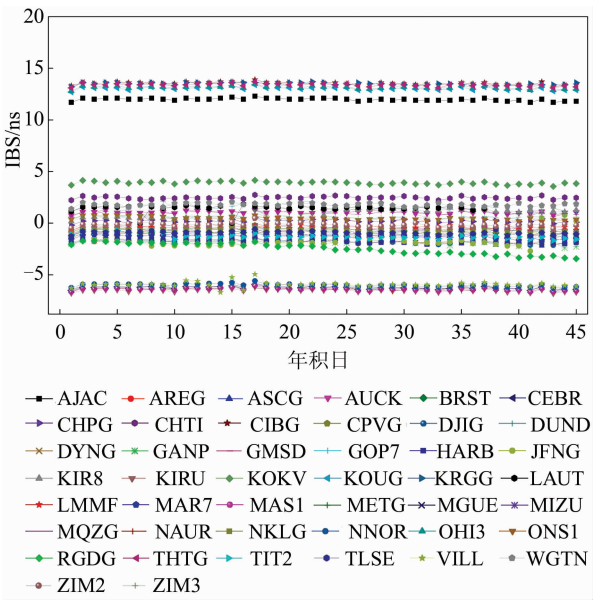


图 4 跟踪站 Galileo ISB 序列
Fig. 4 Galileo ISB Sequence of Monitoring Stations

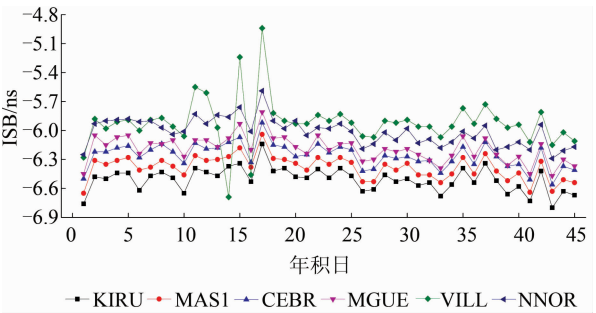


图 5 同一层 Galileo ISB 序列
Fig. 5 Galileo ISB Sequence of the Same Layer of Monitoring Stations

—10~15 ns 之间,即—3.0~4.5 m,每个跟踪站在 45 d 内的变化也很小。与 BDS ISB 类似,各站存在

明显的分层。统计每个跟踪站 Galileo ISB 的 STD 最大为 JFNG 站 0.51 ns,最小为 NAUR 站 0.11 ns,平均为 0.18 ns。通过 45 d 的连续分析,发现 Galileo 卫星 ISB 比 BDS 卫星 ISB 的参数更加稳定。

同样统计了 6 类型号接收机 Galileo ISB 估计值的平均值,如图 6 所示。总体来说,同一类型的接收机对应跟踪站 Galileo ISB 相对较为接近,与 BDS ISB 参数性质类似,TRIMBLE NET R9 接收机中同样出现不合群的 ISB,观察观测数据发现,也是由于天线不同造成的。因此, Galileo ISB 与跟踪站采用的天线类型有关。

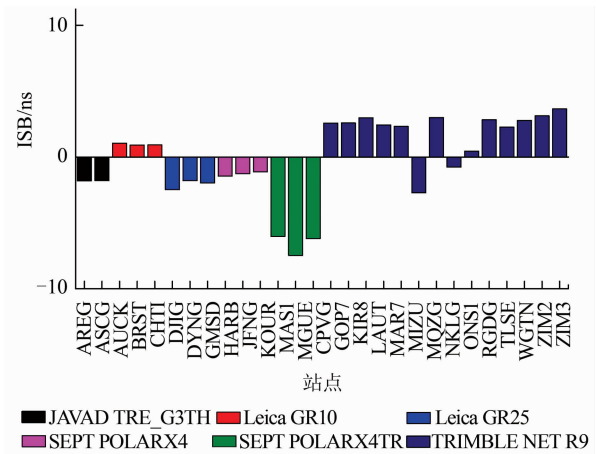


图 6 不同接收机类型的 Galileo ISB 统计
Fig. 6 Galileo ISB Statistics for Different Types Receivers

3.3 GLONASS IFB 分析

由于每个跟踪站每颗卫星 IFB 总的的数据量较大,图 7 只给出了 ALBH 站 GLONASS 系统各卫星 IFB 序列。

ALBH 跟踪站的 IFB 数值在—2~3 ns 之间,即—0.6~0.9 m,振幅基本在 4 ns 以内。统计了 ALBH 站每颗卫星的 GLONASS IFB 的 STD,最大为 R02 卫星 0.78 ns,最小为 R15 卫星 0.33 ns,平均为 0.51 ns,比 BDS 和 Galileo 稳定性略低。这是由于 BDS 和 Galileo 所有星作为一个参数,而 GLONASS 一颗星作为一个参数。

考虑到 GLONASS 采用频分多址技术,频率跟频道号(—7~6)有关,将 ALBH 站每颗卫星 IFB 参数求平均值,分析相同频率(相同频道号)的 IFB 变化,如图 8 所示。可以发现,同频率两颗卫星 IFB 非常接近,最大差异为 0.2 ns,随着频率变化表现出很好的一致性。HARB、JFNG、PERT、KARR、WILL 站采用的是 TRIMBLE NET R9 接收机,同一接收机类型的跟踪站 IFB 结果比较接近,但也有 ns 级的差异,并且随频率变化的趋势也显示出较好的相关性。

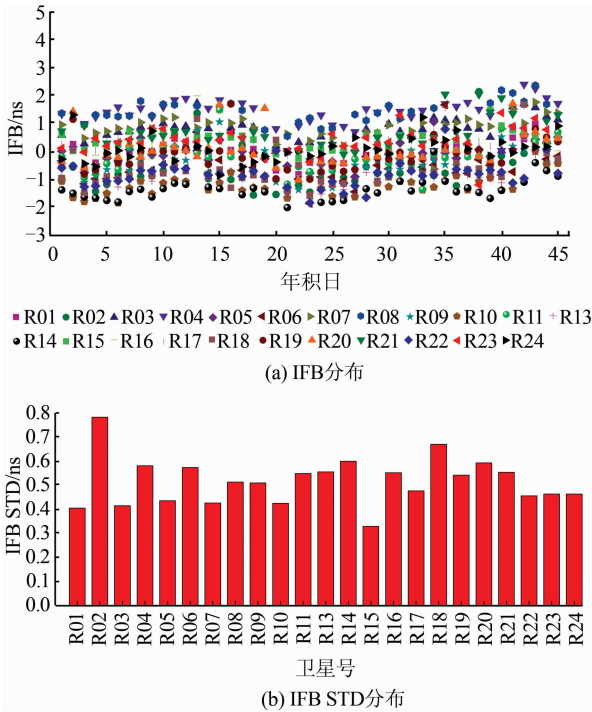


图 7 ALBH 站 GLONASS IFB 统计
Fig. 7 GLONASS IFB Statistics for ALBH Station

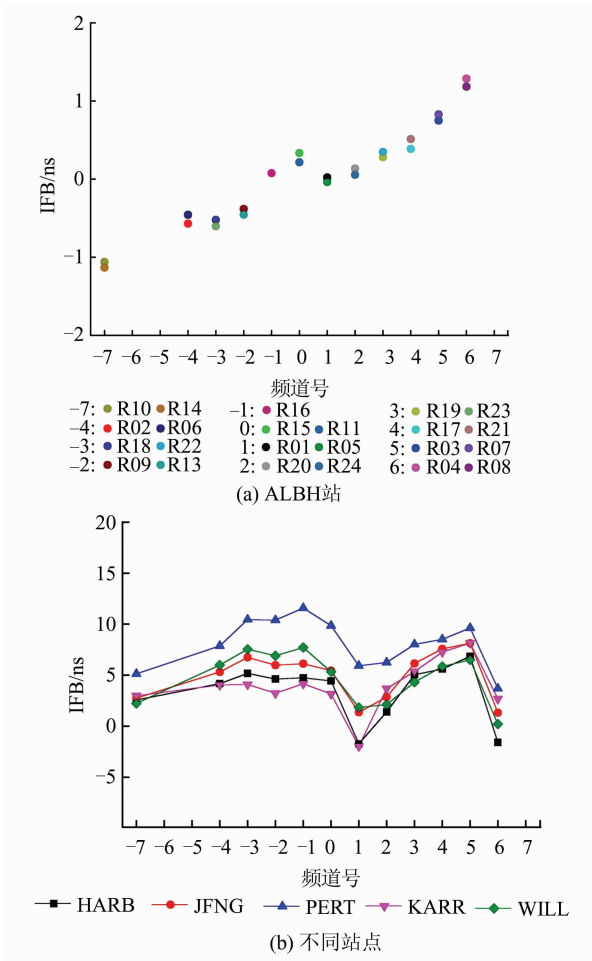


图 8 GLONASS IFB 与频率相关性统计
Fig. 8 Statistics for GLONASS IFB and Frequency Correlation

4 结 语

本文推导了多 GNSS 精密定轨中 BDS/GPS/Galileo/GLONASS 系统 ISB/IFB 解算模型,给出了一种消除 ISB/IFB 秩亏的约束方法,并以 GPS 系统硬件延迟为基准,采用实测数据详细地分析了 ISB/IFB 特性,得出结论如下。

- 1)GNSS 各系统 ISB/IFB 均非常稳定,BDS ISB 的 STD 为 0.36 ns,Galileo ISB 的 STD 为 0.18 ns,GLONASS IFB 的 STD 为 0.51 ns;
- 2)同一系统的各卫星时间序列变化表现出很好的一致性;
- 3)ISB/IFB 参数与接收机和天线类型有关,在接收机类型相同的情况下,不同跟踪站的系统间偏差比较接近,但仍可达到 ns 级差异;
- 4)GLONASS IFB 参数与卫星频率有关,相同频道号的卫星 IFB 非常接近,同一类型接收机 IFB 参数与卫星频率也具有较好的相关性。后续将进一步研究 IFB/ISB 对多 GNSS 系统精密定轨精度和效率的影响。

参 考 文 献

[1] Dang Yamin, Bei Jinzhong, Cheng Yingyan. Principles and Applications of Global Navigation Satellites System [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007(党亚民,秘金钟,成英燕. 全球导航定位系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2007)

[2] Yang Yuanxi, Lu Mingquan, Han Chunhao. Some Notes on Interoperability of GNSS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45 (3): 253-259(杨元喜,陆明泉,韩春好. GNSS 互操作若干问题[J]. 测绘学报,2016,45(3):253-259)

[3] Chen Junping, Zhang Yize, Wang Jungang, et al. Parameter Correlations and Unified Model in Multi-GNSS Precise Point Positioning[C]. 5th China Satellite Navigation Conference, Nanjing, China, 2014 (陈俊平,张益泽,王君刚,等. 多模精密单点定位中的参数相关性及其统一参数模型[C]. 第五届中国卫星导航学术年会,南京,2014)

[4] Wanninger L. Carrier-Phase Inter-frequency Biases of GLONASS Receivers[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(2): 139-148

[5] Sui Xin, Shi Chuang, Xu Aigong, et al. The Stability of GPS/BDS Inter-system Biases at the Receiver End and Its Effect on Ambiguity Resolution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan Uni-*

versity, 2018, 43(2): 175-182,187(隋心, 施闯, 徐爱功, 等. GPS/BDS 接收机端系统偏差稳定性对整周模糊度固定的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(2): 175-182,187)

[6] Zeng Anmin, Yang Yuanxi, Jing Yifan, et al. Systematic Bias Compensation Model of Inter-system Bias and Its Performance Analysis for BDS/GPS Fusion Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (10): 1 423-1 430(曾安敏, 杨元喜, 景一帆, 等. BDS/GPS 融合定位中系统偏差补偿模型及其性能分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(10): 1 423-1 430)

[7] Liu Zhiqiang, Yue Dongjie, Wang Hu, et al. An Approach for Real-Time GPS/GLONASS Satellite Clock Estimation with GLONASS Code Inter-Frequency Biases Compensation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (9): 1 209-1 215(刘志强, 岳东杰, 王虎, 等. 顾及码频间偏差的 GPS/GLONASS 实时卫星钟差估计[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(9): 1 209-1 215)

[8] Gu Shouzhou, Shi Chuang, Dang Yamin, et al. Observation Weight Function Design for Fusing BDS/GPS Data to Estimate the Real-Time Clock with Regard to the Orbit Errors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(S2): 39-45(谷守周, 施闯, 党亚民, 等. 顾及轨道误差 BDS/GPS 实时钟差融合估计的观测权函数设计[J]. 测绘学报, 2016,45(S2):39-45)

[9] Dai Xiaolei. Real-Time Precise GNSS Satellite Orbit Determination Using the SRIF Method: Theory and Implementation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(戴小蕾. 基于平方根信息滤波的 GNSS 导航卫星实时定轨理论与方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2016)

[10] Montenbruck O, Hauschild A, Hessels U. Characterization of GPS/GIOVE Sensor Stations in the CONGO Network[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15 (3): 193-205

[11] Tegedor J, Φvstedal O, Vigen E. Precise Orbit Determination and Point Positioning Using GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou[J]. *Journal of Geodetic Science*, 2014, 4(1): 65-73

[12] Dach R, Schacr S, Lutz S, et al. Combining the Observation from Different GNSS[C]. Eufref 2010 Symposium, Gavle, Sweden, 2010

[13] Zhang Longping, Dang Yamin, Cheng Yingyan, et al. Analysis an Optimization on BDS GEO/IGSO/MEO Ground Monitoring Stations Configuration for Determining GNSS Orbit[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(S2): 82-92(张龙平, 党亚民, 成英燕, 等. 北斗 GEO/IGSO/MEO 卫星定轨地面站构型影响分析及其优化[J]. 测绘学报, 2016,45(S2):82-92)

[14] Li Min. Research on Multi-GNSS Precise Orbit Determination Theory and Application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011(李敏. 多模 GNSS 融合精密定轨理论及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011)

[15] Hu Chao. Methods Study of GNSS Precise Orbit Determination[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014(胡超. GNSS 精密轨道确定方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014)

[16] Liu Zhiqiang, Wang Jiexian, Duan Bingbing. Estimation of GLONASS Code Inter-frequency Biases with Multiple Parameters Based on a Single Station and Its Impact on Combined Precise Point Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(2): 150-159(刘志强, 王解先, 段兵兵. 单站多参数 GLONASS 码频间偏差估计及其对组合精密单点定位的影响[J]. 测绘学报, 2015,44(2): 150-159)

[17] Montenbruck O, Steigenberger P, Khachikyan R, et al. IGS-MGEX: Preparing the Ground for Multi-constellation GNSS Scinece [J]. *Inside GNSS*, 2014, 9(1): 42-49

[18] Zhang Hui, Hao Jinming, Tian Yingguo, et al. Stability Analysis of Receiver ISB for BDS/GPS[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2017, 58(4): 12-23(张辉, 郝金明, 田英国, 等. BDS/GPS 接收机系统间偏差稳定性分析[J]. 天文学报, 2017,58(4):12-23)

month, it is found that the ratio of the absolute value of the correlation coefficient over 0.4 on the monthly scale is 29.17%, and the strong correlation characteristic is shown on the macro. Secondly, wavelet coherence are used to analyze the correlation of annual ZTD and AQI during the period of Beijing 2014—2017. It is found that ZTD and AQI have strong correlation in a certain time frequency domain and pass the 95% confidence test. Finally, according to the correlation analysis of ZTD and AQI in some time domains of Beijing and Changchun, the ZTD and AQI in March in Beijing showed a positive correlation on the whole, and AQI had a good correlation with temperature, pressure, humidity and wind speed. In the study, straw burning in the time domain aggravated the formation of haze in Beijing and Changchun, and then affected the tropospheric delay.

Key words: haze; tropospheric delay; wavelet coherence; AQI

First author: YAO Yibin, PhD, professor, Distinguished Professor of Changjiang Scholar Program, specializes in GNSS data processing and GNSS space environment. E-mail: ybyao@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41574028, 41861058.

+++++
(上接第 2084 页)

ISB/IFB Estimation and Characteristic Analysis with Multi-GNSS Precise Orbit Determination

DANG Yamin¹ ZHANG Longping¹ CHEN Junyong¹
1 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: The effects of inter system bias (ISB) and inter frequency bias (IFB) need to be taken into account in the multi-GNSS precise orbit determination. In this paper, the ISB/IFB estimation model in the context of the multi-GNSS orbit determination is derived. A constraint method for reduce the rank defect about ISB/IFB is presented based on the GPS datum. Experimental results from MGEX data indicate that ISBs/IFBs of the different system are of good stability, and have high consistency for satellite time series in each system. The standard deviation of the BDS ISB, Galileo ISB, GLONASS IFB are 0.36 ns, 0.18 ns, 0.51 ns, respectively. The ISBs from different monitoring stations are relatively closed to those stations with the same type receiver, but ns-level differences can be still achieved. The GLONASS IFBs are consistent with the same channel number satellites of the same monitoring station and different monitoring stations.

Key words: GNSS; datum unification; precise orbit determination; ISB; IFB

First author: DANG Yamin, PhD, professor, specializes in GNSS data processing, regional crustal deformation analysis and modeling by space geodetic techniques, tectonic plate motion and geodynamics, geodetic datum and reference frames. E-mail: dangym@casm.ac.cn

Corresponding author: ZHANG Longping, PhD. E-mail: lpzh1988@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41474011.