



顾及码频间偏差的 GPS/GLONASS 实时卫星钟差估计

刘志强¹ 岳东杰¹ 王虎² 郑德华¹

1 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京, 210098

2 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

摘要: 在进行 GPS/GLONASS 联合卫星钟差估计时, GLONASS 码频间偏差 (inter-frequency bias, IFB) 因卫星频率间的差异而无法被测站接收机钟差参数吸收, 其一部分将进入 GLONASS 卫星钟差估值中。通过引入多个“时频偏差”参数 (inter-system and inter-frequency bias, ISFB) 及附加基准约束对测站 GLONASS 码 IFB 进行函数模型补偿, 实现其与待估卫星钟差参数的有效分离, 并对所估计实时卫星钟差和实时精度单点定位 (real-time precise point positioning, RT-PPP) 进行精度评估。结果表明, 在卫星钟差估计观测方程中忽略码 IFB, 会明显降低 GLONASS 卫星钟差估值精度; 新方法能有效避免码 IFB 对卫星钟差估值的影响, 所获得 GPS、GLONASS 卫星钟差与 ESA(European Space Agency) 事后精密钟差产品偏差平均均方根值分别小于 0.2 ns、0.3 ns。利用实时估计卫星钟差进行静态 RT-PPP, 当观测时段长为 2 h 时, GPS 单系统、GPS/GLONASS 组合系统的 3D 定位精度优于 10 cm, GLONASS 单系统 3D 定位精度约为 15 cm; 三种模式 24 h 单天解的 3D 定位精度均优于 5 cm。

关键词: 实时卫星钟差; 实时精密单点定位; 频间偏差; 时频偏差

中图法分类号:P228

文献标志码:A

高精度的实时卫星钟差改正是支持实时精密单点定位 (real-time precise point positioning, RT-PPP) 技术的关键。由于星载原子钟易受频率稳定性、环境温度变化等因素影响, IGS(International GNSS Service) 及其分析中心提供的超快速卫星钟差产品在数小时内的预报精度可能下降至数个纳秒水平, 无法满足 RT-PPP 的要求。一般利用全球或局域 GNSS (global navigation satellite system) 参考站网络, 在固定 IGS 超快预报轨道和测站位置的前提下进行高精度卫星钟差的实时估计^[1-5]。2013 年 4 月 1 日, IGS 正式推出可提供实时卫星轨道和卫星钟差产品的实时服务 (real-time service, RTS)。目前多数 IGS 分析中心可提供状态空间表示 (state space representation, SSR) 格式的实时 GPS 卫星钟差产品, 其精度约为 0.2~0.3 ns; 仅有少数几个分析中心能提供 GLONASS 实时卫星钟差产品, 其精度为 0.8 ns 左右^[6]。与 GPS 不同, 当前的 GLONASS 系统利用频分多址技术区分来自不同卫星的信号,

由此在接收机内部会产生因通道频率而异的硬件延迟偏差项 (inter-channel bias, ICB), 又称为频间偏差 (inter-frequency bias, IFB)^[7]。已有研究表明, GLONASS 码 IFB 在不同频率通道间的差异可达数米, 且与接收机类型、固件版本、天线类型等因素有关^[8-11]。在卫星钟差实时估计过程中, 各测站接收机 GLONASS 相位 IFB 将由模糊度参数吸收, 而码 IFB 则因各卫星频率间的差异无法被接收机钟差参数吸收。为避免 GLONASS 码 IFB 对待估卫星钟差的影响, 欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 分析中心在生成 GLONASS 超快卫星钟差产品时, 仅在预处理中使用码伪距观测值, 而在卫星钟差参数估计过程中不使用, 导致其超快产品与最终产品存在一个系统性差异^[12]。文献[13]发现, 不同 IGS 分析中心在卫星钟差估计过程中对 GLONASS 码 IFB 的处理策略并不完全相同, 由此造成 GLONASS 卫星钟差产品间存在显著的系统性偏差, 且与频率存在强相关性; 码 IFB 会导致同一分析中心的

GLONASS 卫星钟差产品在相邻天连接时段发生跳变。忽略 GLONASS 码 IFB 对卫星钟差估计精度是否有显著影响,如何在实时卫星钟差估计中对各测站 GLONASS 码 IFB 进行有效建模,值得进一步研究。

本文在分析 GLONASS 码 IFB 对实时卫星钟差估值影响的基础上,提出一种附加时频偏差参数的 GPS/GLONASS 实时卫星钟差估计方法,并通过实测数据分别评估 GPS/GLONASS 实时估计卫星钟差和 RT-PPP 的精度。

1 GPS/GLONASS 卫星钟差估计观测方程

利用 GNSS 参考站网提供的实时载波相位和伪距观测值,对于测站 r 、GPS 卫星 i ,可建立观测方程:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{IF},i}^G = \rho^G + c(dt_r^G - dt_i^{G/s}) + \lambda^G N_{\text{IF},i}^G + \delta_{\text{trop},i}^G + \epsilon_{\Phi}^G \\ P_{\text{IF},i}^G = \rho^G + c(dt_r^G - dt_i^{G/s}) + \delta_{\text{trop},i}^G + \epsilon_P^G \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\Phi_{\text{IF},i}^G$ 、 $P_{\text{IF},i}^G$ 分别为相位和伪距消电离层组合观测值; ρ^G 为站星几何距离; dt_r^G 、 $dt_i^{G/s}$ 分别为接收机钟差与卫星钟差; $N_{\text{IF},i}^G$ 为消电离层相位模糊度, λ^G 为对应的波长; $\delta_{\text{trop},i}^G$ 为对流层延迟; ϵ_{Φ}^G 、 ϵ_P^G 分别为相位和伪距观测噪声; c 为真空中光速。

由于 IGS 各分析中心提供的超快预报卫星轨道误差相对较小(约 ± 5 cm),且能被估计的卫星钟差吸收,因此在卫星钟差实时估计中一般采用固定预报卫星轨道的策略。GNSS 参考站的位置可以从 IGS 最新公布的解独立交换格式(solution independent exchange format, SINEX)文件中提取。于是,式(1)的待估参数为 GPS 卫星钟差、接收机钟差、对流层延迟及模糊度参数,误差方程的简化形式可表示为:

$$\begin{cases} v_{\Phi_{\text{IF},i}}^G = c(dt_r^G - dt_i^{G/s}) + m_i^G \delta_{\text{zwd}} + \lambda^G N_{\text{IF},i}^G + \tilde{\Phi}_{\text{IF},i}^G \\ v_{P_{\text{IF},i}}^G = c(dt_r^G - dt_i^{G/s}) + m_i^G \delta_{\text{zwd}} + \tilde{P}_{\text{IF},i}^G \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\tilde{\Phi}_{\text{IF},i}^G$ 、 $\tilde{P}_{\text{IF},i}^G$ 分别为扣除卫地距并进行各项误差改正后的相位和伪距观测值; $v_{\Phi_{\text{IF},i}}^G$ 、 $v_{P_{\text{IF},i}}^G$ 为对应的观测值改正数; δ_{zwd} 为天顶对流层湿延迟; m_i^G 为对应的映射函数。

在联合 GPS/GLONASS 进行卫星钟差估计时,需估计两个接收机钟差项,即 GPS 和 GLONASS 接收机钟差。由于 GPS 卫星信号采用相同

固定频率,因而 GPS 接收机码硬件延迟将由 GPS 接收机钟差吸收。对于 GLONASS 接收机码硬件延迟,码 IFB 因频率不同而存在差异,故 GLONASS 接收机钟差将仅吸收接收机码硬件延迟的公共部分。另外,若 GPS 与 GLONASS 卫星钟差采用的时间参考基准不同,还应考虑二者的系统时间偏差。一般通过引入“系统时差”(inter-system bias, ISB)参数,将 GLONASS 接收机钟差表达成 GPS 接收机钟差与系统时差之和的形式^[14-15]:

$$dt_r^R = dt_r^G + dt_{\text{ISB},r} = dt_r^G + (dt_{\text{SYS}} + M_r^R - D_r^G) \quad (3)$$

式中, dt_r^G 、 dt_r^R 分别为 GPS、GLONASS 接收机钟差; $dt_{\text{ISB},r}$ 为系统时差 ISB; dt_{SYS} 为系统时间偏差; M_r^R 为 GLONASS 接收机码平均延迟; D_r^G 为 GPS 接收机码延迟。

式(3)中的“系统时差” $dt_{\text{ISB},r}$ 未包含 GLONASS 接收机码 IFB。GLONASS 码 IFB 一部分会被估计的 GLONASS 卫星钟差吸收,其余部分将体现在码伪距观测值残差中。由于相位模糊度参数的存在,高精度的相位观测值仅决定卫星钟差在历元间的精确变化,而伪距观测值对钟差解的主要贡献在于提供所估计钟差的时间参考基准^[16]。在卫星钟差实时估计过程中,每颗 GLONASS 卫星在不同历元间所参与求解的测站数会发生变化,卫星钟差估值将受到不同测站接收机 GLONASS 码 IFB 的综合影响。

2 GLONASS 码 IFB 函数模型补偿

为实现测站接收机 GLONASS 码 IFB 与待估卫星钟差参数的有效分离,可对每个测站观测的 GLONASS 卫星对应观测方程均设置一个待估码 IFB 参数。但引入该参数将与 dt_{SYS} 、 M_r^R 及 D_r^G 线性相关,从而导致观测方程秩亏。考虑到同一测站不同 GLONASS 卫星的 dt_{SYS} 、 M_r^R 及 D_r^G 都是相同的,因此可将 GLONASS 接收机码“频间偏差”与“系统时差”参数进行合并,即引入独立“时频偏差”(inter-system and inter-frequency bias, ISFB)参数 dt_{ISFB} :

$$dt_{\text{ISFB},j,r} = dt_{\text{ISB},r} + \bar{B}_{j,r} \quad (4)$$

式中, $\bar{B}_{j,r} = \frac{f_{K,1}^2 \hat{B}_{bj,r}^{P1} - f_{K,2}^2 \hat{B}_{bj,r}^{P2}}{f_{K,1}^2 - f_{K,2}^2}$ 为消电离层线性组合值对应的 GLONASS 码 IFB; $\hat{B}_{bj,r}^{P1}$ 、 $\hat{B}_{bj,r}^{P2}$ 为原始码伪距观测值对应的 IFB; $f_{K,1}$ 、 $f_{K,2}$ 分别表示 L_1 和 L_2 载波的频率,下标 K 表示 GLONASS 卫星 j 所对应的频率通道号。

顾及码 IFB 的 GLONASS 卫星钟差估计误

差方程为:

$$\begin{cases} v_{\phi_{IF,j}}^R = c(dt_r^G + dt_{ISFB,j,r} - dt_j^{R/s}) + m_j^R \delta_{zwd} + \lambda_R N_{IF,j}^R + \tilde{\Phi}_{IF,j}^R \\ v_{P_{IF,j}}^R = c(dt_r^G + dt_{ISFB,j,r} - dt_j^{R/s}) + m_j^R \delta_{zwd} + \tilde{P}_{IF,j}^R \end{cases} \quad (5)$$

式(5)与式(2)中符号相同的参数含义是相同的,在此用上标 R 表示 GLONASS 系统。联立方程式(2)和式(5)进行 GPS/GLONASS 卫星钟差联合估计时,待估的接收机钟差与卫星钟差参数存在列相关,具有不可分离性。为解决由此造成的法方程奇异,通常选定配备原子钟的一个或多个参考站,将其接收机钟作为参考钟,因而估计得到的卫星钟差都是相对于该参考钟的。另外,方程式(5)中设置的“时频偏差”参数与接收机钟差、GLONASS 卫星钟差均线性相关。为此,可引入附加约束条件,假定每个测站所有待估“时频偏差”之和为 0:

$$\sum_{j=1}^n dt_{ISFB,j,r} = 0 \quad (6)$$

式中, n 为该测站当前历元观测到的 GLONASS 卫星数。将上述“时频偏差”基准为 0 的约束条件视为虚拟观测值,可与观测方程式(2)和式(5)联立,采用 Kalman 滤波进行 GPS/GLONASS 卫星钟差的实时估计。

3 实验与分析

3.1 数据来源与处理策略

目前大多数 IGS 分析中心用于 GPS 精密卫星钟差实时产品生成的参考站数一般在 50 个以上。相对于 GPS 单系统, GPS/GLONASS 双系统大规模参考站网的数据处理效率要显著降低。顾及本文方法的实时应用效率,选取了全球均匀分布的 30 个 GPS/GLONASS 跟踪站用于卫星钟差的实时估计,测站分布如图 1 所示。为对比分析卫星钟差估计过程中是否考虑 GLONASS 码 IFB 对钟差解的影响,分别按以下两种方案进行钟差估计:方案 1, 每个测站仅估计一个“系统时差”参数(inter-system bias, ISB);方案 2, 每个测站观测的 GLONASS 卫星对应观测方程均设置独立的“时频偏差”参数(inter-system and inter-frequency bias, ISFB)进行估计。

测站位置固定为 IGS 最近 SINEX 文件中提取的三维坐标;卫星位置采用 ESA 超快预报卫星轨道产品;GPS、GLONASS 卫星钟差初值均采用 ESA 超快卫星钟差产品的预报值;其他误差源如潮汐效应、相对论效应、相位缠绕、天线相位偏差

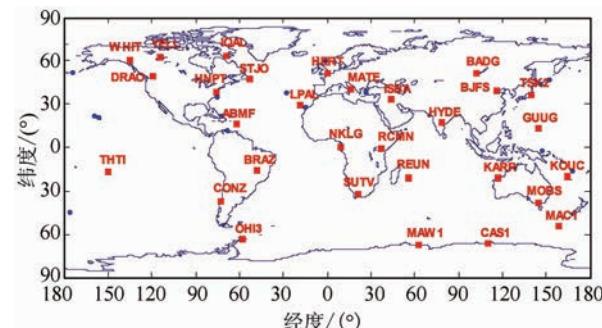


图 1 卫星钟差实时估计采用 IGS 测站分布图

Fig. 1 Distribution of the IGS Stations Selected for Real-Time Satellite Clock Estimation

及变化等,对以上两种方案均采用相同的改正策略。对于 GPS 与 GLONASS 系统时间偏差、码平均硬件延迟及频间偏差,在相邻历元较短的时间间隔内其变化可以认为是平稳的,因此两种方案的 ISB 和 ISFB 参数均视为随机游走过程处理。

3.2 实时卫星钟差估计结果分析

从 IGS 下载所选测站 30 s 间隔观测数据 RINEX 文件用于模拟实时数据流,观测时间为 2014 年 DOY(day of year)41。选择测站 MATE 的接收机钟作为参考钟,将 GPS/GLONASS 卫星钟差实时估计结果与 ESA 的事后精密卫星钟差产品(30 s 间隔)进行比较。由于本实验对参考钟及参与求解测站的选择与 ESA 存在不一致,所估计得到的卫星钟差将与 ESA 事后产品间存在系统性偏差。对于整个星座的整体性偏差项,在 PPP 定位中可被接收机钟差吸收,而在进行卫星钟差精度评估时则应将其扣除。按 § 3.1 设计的两种方案,对 GPS/GLONASS 卫星钟差进行 Kalman 滤波估计,并将得到的实时估计钟差与 ESA 事后精密卫星钟差进行比较。在扣除卫星钟差整体性偏差项后,两种方案得到的初始钟偏差与 ESA 事后产品对应值的互差如图 2 所示。

从图 2 可以看出,对于 GPS 卫星,是否考虑 GLONASS 码 IFB 对其钟差整体性偏差并无影响,两种方案得到的初始卫星钟差值较为一致。多数 GPS 卫星实时估计钟差与 ESA 事后产品的初始钟偏差间的差异在 ± 0.2 m 内;个别卫星如 PRN01、PRN27 的差异超过 0.4 m,这可能与以上两颗卫星搭载新一代 Block IIF Rb 钟有关。对于 GLONASS 卫星,在采用相同参考站进行钟差估计的情况下,不同的码 IFB 处理策略会得到不

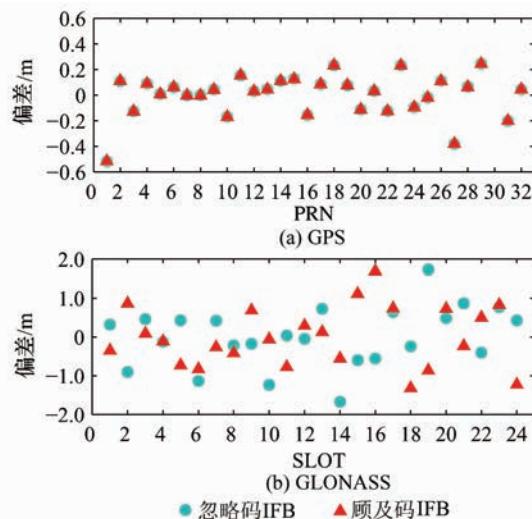


图2 实时估计初始钟偏差与ESA事后产品值互差

Fig. 2 Differences of the Initial Clock Biases Between the Estimates and the ESA Final Products

同的初始钟偏差值,同一颗卫星因是否考虑码IFB所引起的差异可达2.5 m以上;与ESA事后产品初始钟偏差相比较,两种方案偏差的波动范围均在±2 m以内。由于GLONASS码IFB的大小与参考站所采用的接收机及天线类型等相关,因而选择与ESA不同的参考站分布及码IFB处理策略所得到的初始钟偏差值将会不同。对于PPP应用,卫星钟差产品中的初始钟偏差会被模糊度参数吸收而不影响位置参数估计。

在对星座整体性偏差和卫星相关的初始钟偏差进行扣除后,以ESA事后精密卫星钟差产品为参考值,可进行卫星钟差估计精度的评估。为分析方便起见, GPS卫星钟按星座及频标类型、GLONASS卫星钟按信号频率任选1颗卫星,相关卫星信息见表1。

表1 用于钟差估计结果分析的卫星信息

Tab. 1 Satellite Information Selected for Satellite Clock Estimate Analysis

系统	卫星	卫星及频标类型[频率号]	
GPS	G03	Block IIA Cs	G26 Block IIA Rb
	G11	Block IIR-A Rb	G19 Block IIR-B Rb
	G07	Block IIR-M Rb	G24 Block IIF Cs
	G01	Block IIF Rb	
GLONASS	R14	Cs[-7] R06	Cs[-4] R22 Cs[-3]
	R13	Cs[-2] R16	Cs[-1] R15 Cs[0]
	R05	Cs[1] R24	Cs[2] R23 Cs[3]
	R21	Cs[4] R07	Cs[5] R08 Cs[6]

由于GLONASS码IFB对GPS卫星钟差估计影响甚微,方案1与方案2得到的GPS钟差结果均方根(roat means square, RMS)值差异非常

小(小于±0.01 ns),在此仅给出顾及码IFB处理方案的GPS实时钟差估计结果,如图3所示。图4、图5分别给出了方案1与方案2所得到的GLONASS实时卫星钟差结果。从图3可以看出,在卫星钟差估计初始阶段, GPS卫星钟差结果波动范围较大,各卫星初始钟偏差的收敛需要较长时间。这一方面可能与估计采用的参考站数相对较少有关;另一方面,每个测站增加多个附加时频偏差参数,会影响卫星钟差估值的解算效率。在经过5~6 h收敛之后,各卫星钟差估值偏差均能稳定在±0.1 m范围内。对比图4、图5可以发现,方案1的GLONASS卫星钟差估值偏差要明显大于方案2,经过数小时后仍在±0.2 m范围内波动;而方案2多数卫星钟差估值在±0.1 m范围内波动。

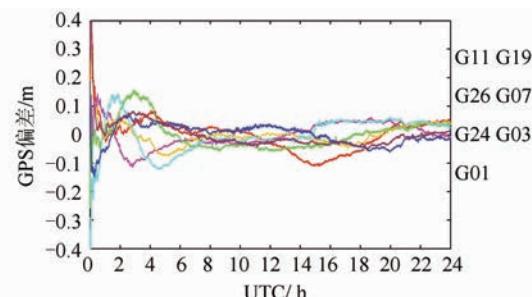


图3 GPS实时钟差偏差

Fig. 3 Biases of the GPS Real-Time Satellite Clock Estimates

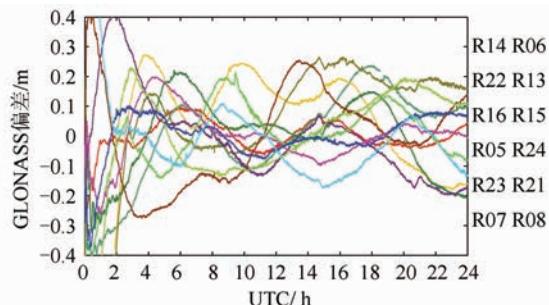


图4 忽略码IFB的GLONASS实时钟差偏差

Fig. 4 Biases of the GLONASS Real-Time Satellite Clock Estimates Ignoring IFBs

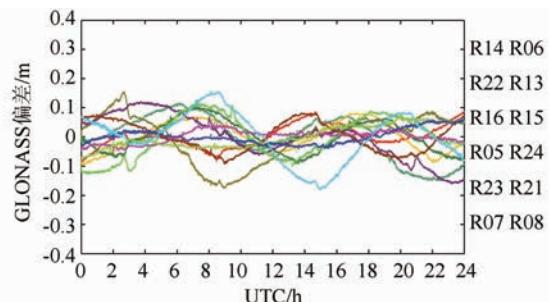


图5 顾及码IFB的GLONASS实时钟差偏差

Fig. 5 Biases of the GLONASS Real-Time Satellite Clock Estimates with IFBs Compensation

在卫星钟差估计过程中,每颗 GLONASS 卫星不同历元所参与求解的参考站会不断变化。

由于方案 1 并不考虑 GLONASS 码伪距观测值中的频间偏差项,在扣除卫星钟常数偏差后,各参考站码 IFB 的综合影响将使得 GLONASS 卫星钟差估值出现较大范围的波动。方案 2 通过设置“时频偏差”参数对各测站码 IFB 进行估计,并附加基准约束条件实现与卫星钟差参数的分离,GLONASS 实时卫星钟差估值结果与 ESA 事

后卫星钟差产品偏差较方案 1 更小。

在 GPS/GLONASS 实时卫星钟差估计收敛后,计算 2014 年 DOY 41 的卫星钟差估值与 ESA 事后精密钟差产品互差的 RMS 值,如图 6 所示。可以看出,两种方案所得到的 GPS 卫星钟差精度统计值较为符合,且平均 RMS 值均小于 0.2 ns;对于 GLONASS 卫星钟差,方案 1 的 RMS 值要明显大于方案 2,部分卫星 RMS 值超过 0.7 ns,而方案 2 多数卫星 RMS 值小于 0.3 ns。

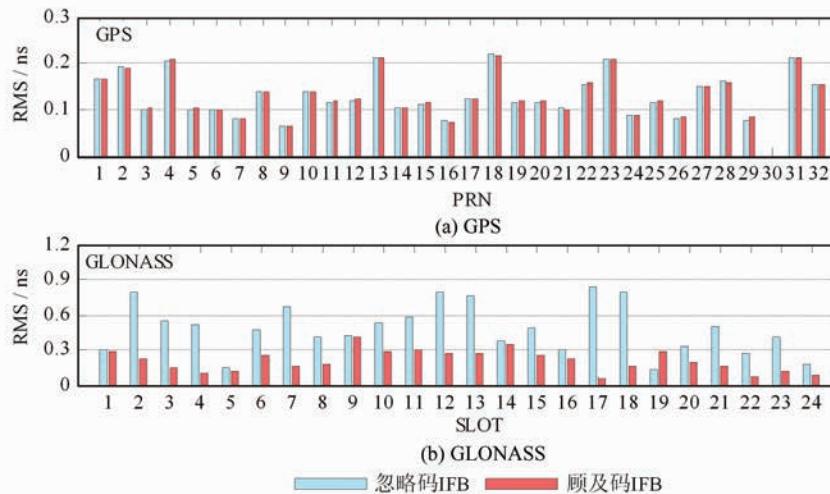


图 6 GPS/GLONASS 实时钟差精度统计

Fig. 6 Comparison of RMS of the GPS/GLONASS Real-Time Satellite Clock Estimate Biases with/without IFB Compensation

3.3 RT-PPP 精度评估

由于 PPP 对卫星钟差产品质量较为敏感,选取欧洲区域 10 个 IGS 参考站,设计 GPS 单系统、GLONASS 单系统和 GPS/GLONASS 组合系统三种模式下的 RT-PPP 实验,用于对 § 3.2 方案 2 估计的实时卫星钟差质量进行评估。

选取 2014 年 DOY 41 收敛后(6~24 h)的卫星钟差估值结果进行 RT-PPP 实验,其中测站 AJAC、PENC 的定位结果如图 7 所示。对于 GLONASS 单系统,在滤波初始阶段两个测站的东分量(E)、高程分量(U)偏差较大且存在明显相关性,直至数小时后仍无法收敛至与北分量(N)相同的偏差水平。这除了与 GLONASS 观测值精度及卫星分布等因素相关外,主要由于 GLONASS 实时卫星钟差精度相对较低,由此确定的模糊度精度较差引起的。对于 GPS 单系统,两测站平面分量在较短时间内均收敛至厘米级水平,其中测站 PENC 初始收敛阶段高程分量偏差稍大(约为 10 cm),测站 AJAC 在 12 h 后出现高程偏差增大的情况,这与不同时段观测 GPS 卫星的钟差估值精度有关。对于 GPS/GLONASS 组合

系统,随着滤波的收敛两测站各分量偏差均在 ±5 cm 以内变化。

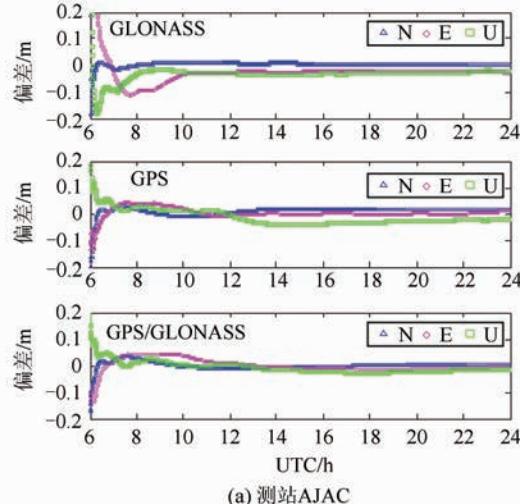
为进一步评估不同时段静态 RT-PPP 所能达到的精度,对 10 个测站 2014 年 DOY 41~54 共两周的连续观测数据,按时段长 2 h、6 h、12 h、24 h 进行划分,分别利用方案 2 估计得到的 GPS/GLONASS 卫星钟差进行 RT-PPP,并计算其与 IGS 公布测站坐标 3D 偏差 RMS 值,结果如图 8 所示。可以看出,当观测时段长为 2 h 时, GPS/GLONASS 组合系统的定位精度要优于 GPS 单系统,测站偏差 RMS 值均小于 10 cm; GLONASS 单系统 3D 定位精度约为 15 cm。当观测时段长超过 6 h 后, GPS/GLONASS 组合系统与 GPS 单系统的定位精度相当;对于 24 h 单天解,3 种模式下进行 RT-PPP 均能获得优于 5 cm 的 3D 定位精度。

4 结语

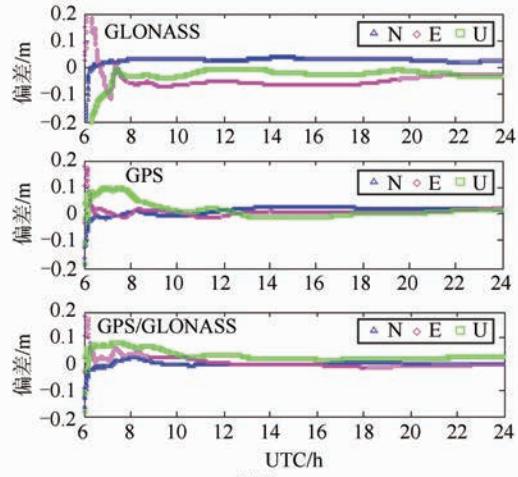
在联合 GPS/GLONASS 进行实时精密卫星钟差估计过程中,传统方法在函数建模中未考虑

GLONASS 码伪距频间偏差项, 所估计的 GLONASS 卫星钟差将吸收来自不同 GNSS 参考站的部分 GLONASS 接收机码频间偏差, 从而造成卫星钟差估值精度的降低。本文通过在函数模型中为每个参与解算测站设置多个独立“时频偏差”参数, 吸收该测站接收机的 GLONASS 码频间偏

差, 并通过选择参考钟及附加测站 ISFB 约束条件, 实现时频偏差 ISFB 参数与接收机钟差、GLONASS 卫星钟差的有效分离。实验结果表明, 新方法在不影响 GPS 实时卫星钟差估值精度的情况下, 能明显提高 GLONASS 实时卫星钟差估值的精度。



(a) 测站AJAC



(b) 测站PENC

图 7 不同模式下 RT-PPP 定位结果

Fig. 7 RT-PPP N/E/U Biases with Different Processing Modes Using the Estimated Satellite Clocks

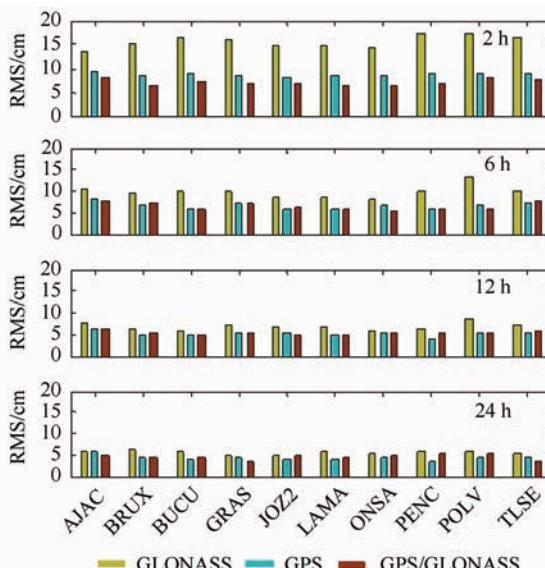


图 8 各测站 3D 偏差 RMS 值

Fig. 8 RMS of RT-PPP 3D Biases with Different Observation Modes Using the Estimated Satellite Clocks

参 考 文 献

- [1] Hauschild A, Montenbruck O. Kalman-Filter-Based GPS Clock Estimation for Near Real-Time Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(3): 173-182
- [2] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P. Real Time Precise GPS Constellation Orbits and Clocks Estimation Using Zero-Difference Integer Ambiguity
- [3] Zhang X H, Li X X, Guo F. Satellite Clock Estimation at 1 Hz for Realtime Kinematic PPP Applications [J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(4): 315-324
- [4] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Guo Fei, et al. Service-Based Real-Time Precise Point Positioning and Its Application [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(6): 1 308-1 314 (张小红, 李星星, 郭斐, 等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1 308-1 314)
- [5] Li Haojun, Wang Jieyan, Chen Junping, et al. The Realization and Analysis of GNSS Network Based Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(6): 1 302-1 307 (李浩军, 王解先, 陈俊平, 等. 基于 GNSS 网络的实时精密单点定位及精度分析 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1 302-1 307)
- [6] Hadas T, Bosy J. IGS RTS Precise Orbits and Clocks Verification and Quality Degradation Over Time [J]. *GPS Solutions*, 2014, 19(1): 93-105
- [7] Rossbach U. Positioning and Navigation Using Russian Satellite System GLONASS [D]. Germany: University of the Federal Armed Forces Munich, 2001
- [8] Yamada H, Takasu T, Kubo N, et al. Evaluation

- and Calibration of Receiver Inter-channel Biases for RTK-GPS/ GLONASS[C]. The 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2010
- [9] Meindl M, Dach R, Jean Y. International GNSS Service Technical Report 2011[R]. Switzerland: University of Bern, 2012
- [10] Shi C, Yi W T, Song W W, et al. GLONASS Pseudorange Inter-Channel Biases and Their Effects on Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 439-451
- [11] Liu Zhiqiang, Wang Jie, 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)
- [12] Springer T. IGSMAIL-6107: ESA/ESOC Ultra-
- Rapid and Rapid GNSS Solutions[EB/OL]. <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igs-mail/2010-006178.html>, 2010-03-07
- [13] Song W W, Yi W T, Lou Y D, et al. Impact of GLONASS Pseudorange Inter-Channel Biases on Satellite Clock Corrections [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 323-333
- [14] Cai C S, Gao Y. Modeling and Assessment of Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 223-236
- [15] Meng Xiangguang, Guo Jiming. GPS/GLONASS and Their Combined Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(12): 1409-1413 (孟祥广, 郭际明. GPS/GLONASS 及其组合精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(12): 1409-1413)
- [16] Ge M, Chen J, Douša J, et al. A Computationally Efficient Approach for Estimating High-Rate Satellite Clock Corrections in Realtime[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1): 9-17

An Approach for Real-Time GPS/GLONASS Satellite Clock Estimation with GLONASS Code Inter-Frequency Biases Compensation

LIU Zhiqiang¹ YUE Dongjie¹ WANG Hu² ZHENG Dehua²

1 School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: In GPS/GLONASS satellite clock estimation, GLONASS code inter-frequency biases (IFB) can not be assimilated into the receiver clock parameters due to the discrepancy of GLONASS frequencies, which is partly involved in the GLONASS satellite clock estimates. In order to separate the GLONASS IFBs and the satellite clock estimates effectually, an approach for real-time GPS/GLONASS satellite clock estimation with multiple inter-system and inter-frequency bias (ISFB) parameters and additional restriction is proposed. The estimated satellite clocks and real-time precise point positioning results are then evaluated. The results show that ignoring GLONASS code IFBs could dramatically degrade the GLONASS satellite clock accuracy. The new approach can efficiently avoid the adverse impact of GLONASS code IFBs on satellite clock estimates. Compared with the ESA final satellite clock products, the average RMS of clock biases are less than 0.2 ns for GPS and 0.3 ns for GLONASS respectively. RT-PPP experiments were conducted with different session lengths. The 3D positioning accuracy of RT-PPP using the estimated satellite clocks was better than 10 cm for GPS-only and combined GPS/GLONASS modes, 15 cm for GLONASS-only mode with 2-h observations, and better than 5 cm for all the three modes with 24-h observations.

Key words: real-time satellite clock corrections; real-time PPP; inter-frequency bias; inter-system and inter-frequency bias

First author: LIU Zhiqiang, PhD, specializes in satellite geodesy. E-mail: zqliuer@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41404025, 41604018; the Prospective Joint Research Project of Jiangsu Province, No. BY2015002-04.