

DOI:10.13203/j.whugis20150456



文章编号:1671-8860(2018)01-0107-05

多模 GNSS 精密卫星钟差估计与分析

屈利忠^{1,2,3} 杜明义^{1,2} 王 坚^{1,2} 赵齐乐³ 郭 靖³

1 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京,102600

2 北京建筑大学建筑遗产精细重构与健康监测北京市重点实验室,北京,1202600

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:对基于历元间差分相位和非差伪距观测值的混合差分卫星钟差估计方法进行了改进,实现了多模全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)卫星钟差联合快速估计。选择了全球分布的 50 个跟踪站进行实验,对卫星钟差精度进行了分析和精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)验证。结果表明:多模卫星钟差与武汉大学提供的最终精密卫星钟差互差优于 0.2 ns,精密单点定位结果与武汉大学发布的最终精密卫星轨道和钟差产品的定位精度相当。

关键词:多模 GNSS;历元间差分相位和非差伪距观测值;精密卫星钟差估计;PPP

中图法分类号:P228

文献标志码:A

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术具有定位精度高,数据采集方便,数据处理简单等优点,成为近年来实时精密定位服务的重要手段。实时精密单点定位服务将卫星精密轨道和钟差实时播发给用户^[1]。IGS 已经开展了实时实验计划(real-time pilot project, RTPP),各个分析中心播发的 GPS 实时精密轨道精度为 4~8 cm,精密钟差精度为 0.2~0.8 ns。实时精密轨道通常采用的是超快速预报轨道,由于超快速轨道精度不如最终精密轨道,为了实现高精度实时定位,通过实时估计卫星钟差吸收部分轨道误差。国内外学者对实时精密卫星钟差估计算法进行了大量研究,主要包括非差模式和历元间差分模式。非差模式精密卫星钟差估计方法待估参数过多,计算效率较低^[2]。采用历元间差分方法时,模糊度参数被消除,计算速率加快,但初始时刻卫星钟差会引入与卫星相关的偏差^[3]。为了消除该项偏差的影响,Zhang 等^[4]提出了利用非差相位和伪距观测值和历元间差分相位和伪距观测值并行计算的方法。Ge 等^[5]提出了利用历元间差分相位观测值和非差伪距观测值并行计算的方法。

全球卫星导航系统发展迅猛,继美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 后,欧洲正在开发 Galileo 卫星导航系统,我国已经建立了功能完善的第二代北斗区域卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)^[6]。相关研究表明多系统融合增加了可观测卫星数目,改善了卫星空间几何结构,提高了定位的准确性,可靠性和连续性^[7]。因此,多系统融合逐渐成为了高精度卫星导航定位广大用户的必然选择,而多系统实时卫星钟差的精确估计是实现多系统高精度实时定位服务的前提。本文对基于历元间差分相位观测值和非差伪距观测值的卫星钟差估计方法进行了改进,实现了 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 多系统卫星钟差联合快速估计。

1 多模精密卫星钟差估计数学模型

基于无电离层组合伪距和相位的观测方程为:

$$\begin{cases} P_r^s = \rho_0^s + c(dt_r - dt^s) + T_r + c(B_r - B^s) + e_s \\ L_r^s = \rho_0^s + c(dt_r - dt^s) - \lambda N^s + \\ T_r + c(b_r - b^s) + \epsilon_s \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2015-12-19

项目资助:国家自然科学基金(41374034);国家 863 计划(2014AA123101);国际 GNSS 检测评估项目(iGMAS);中央高校基本科研业务费专项资金(2042014gf026)。

第一作者:屈利忠,博士,主要从事高精度 GNSS 数据处理的理论与方法研究。qulizhong@whu.edu.cn

通讯作者:郭靖,博士。jingguo@whu.edu.cn

式中, r 为测站号; s 为卫星号; P_r^s 和 L_r^s 为无电离层组合伪距和相位观测值; ρ_0^s 为站-星间几何距离; c 为光速; dt_r 为接收机钟差; dt^s 为卫星钟差; T_r 为传播路径上对流层延迟误差; N^s 为无电离层组合整周模糊度; λ 为无电离层组合波长; B_r 、 b_r 分别为接收机端无电离层组合伪距和相位的硬件延迟; B^s 、 b^s 分别为卫星端无电离层组合伪距和相位的硬件延迟; e_s 、 ε_s 分别为伪距和相位的测量噪声, 多路径误差通常归入到测量噪声内。

参数估计时, 接收机伪距硬件延迟 B_r 被接收机钟差 dt_r 吸收, 卫星伪距硬件延迟 B^s 被卫星钟差 dt^s 吸收, 固定测站坐标, 式(1)线性化为:

$$\begin{cases} v_{P_r^s} = c(\delta t_r - \delta t^s) + m_r^s dT_r - \text{OMC}_{P_r^s} \\ v_{L_r^s} = c(\delta t_r - \delta t^s) - \lambda \tilde{N}^s + m_r^s dT_r - \text{OMC}_{L_r^s} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\delta t_r = dt_r + B_r$; $\delta t^s = dt^s + B^s$; $\tilde{N}^s = N^s + c(b_r - b^s - B_r + B^s)/\lambda$; $\text{OMC}_{P_r^s} = P_r^s - \rho_0^s$; $\text{OMC}_{L_r^s} = L_r^s - \rho_0^s$; m_r^s 和 dT_r 分别为对流层湿延迟投影函数和残余误差; $v_{P_r^s}$ 和 $v_{L_r^s}$ 分别为伪距和相位观测值残差。

由式(2)可得历元间差分的相位观测值为:

$$\Delta v_{L_r^s} = c(\Delta \delta t_{r, \text{sys}} - \Delta \delta t^s) + \Delta m_r^s dT_r - \Delta \text{OMC}_{L_r^s} \quad (3)$$

式中, $\text{sys} = \text{G, R, E, B}$, 文中 G 代表 GPS, R 代表 GLONASS, E 代表 Galileo, B 代表 BDS; $\Delta \delta t_{r, \text{sys}}$ 为系统 sys 相邻历元间接收机钟差改正数之差; $\Delta \delta t^s$ 为相邻历元间卫星钟差改正数之差; 在规定的弧段内, 对流层湿延迟的投影函数 m_r^s 发生变化, 对投影函数进行历元间做差分得 Δm_r^s ; 天顶对流层湿延迟残余误差参数 dT_r 作为分段线性常数估计; $\Delta \text{OMC}_{L_r^s}$ 为相位观测值与计算值之差 $\text{OMC}_{L_r^s}$ 的历元间差, $\Delta v_{L_r^s}$ 为相邻历元间相位观测值残差之差。

多系统卫星钟差估计时, 同一测站不同系统接收机端伪距硬件延迟不同, 不同系统接收机钟差存在差异^[8]。此时可以估计一个接收机钟差和多个系统时间差, 或者同时估计若干个接收机钟差^[9]。本文同时估计了 4 个系统的接收机钟差参数。则多模融合卫星钟差估计误差为:

$$\begin{cases} \Delta v_{L_r^i} = c(\Delta \delta t_{r, \text{G}} - \Delta \delta t^i) + \Delta m_r^i dT_r - \Delta \text{OMC}_{L_r^i} \\ \Delta v_{L_r^j} = c(\Delta \delta t_{r, \text{R}} - \Delta \delta t^j) + \Delta m_r^j dT_r - \Delta \text{OMC}_{L_r^j} \\ \Delta v_{L_r^k} = c(\Delta \delta t_{r, \text{E}} - \Delta \delta t^k) + \Delta m_r^k dT_r - \Delta \text{OMC}_{L_r^k} \\ \Delta v_{L_r^l} = c(\Delta \delta t_{r, \text{B}} - \Delta \delta t^l) + \Delta m_r^l dT_r - \Delta \text{OMC}_{L_r^l} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i = 1, \dots, n_G$; $j = 1, \dots, n_R$; $k = 1, \dots, n_E$; $l =$

$1, \dots, n_B$; n_{sys} 为测站 r 接收到系统 sys 卫星个数; $\delta t_{r, \text{G}}, \delta t_{r, \text{R}}, \delta t_{r, \text{E}}, \delta t_{r, \text{B}}$ 分别为测站相邻历元间的 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 接收机钟差改正数之差; $\Delta \delta t^i, \Delta \delta t^j, \Delta \delta t^k, \Delta \delta t^l$ 分别为第 i 颗 GPS 卫星, 第 j 颗 GLONASS 卫星, 第 k 颗 Galileo 卫星, 第 l 颗 BDS 卫星的相邻历元间卫星钟差改正数之差; $\Delta m_r^i, \Delta m_r^j, \Delta m_r^k, \Delta m_r^l$ 分别为第 i 颗 GPS 卫星, 第 j 颗 GLONASS 卫星, 第 k 颗 Galileo 卫星, 第 l 颗 BDS 卫星对应的对流层湿延迟投影函数之差; $\Delta \text{OMC}_{L_r^i}, \Delta \text{OMC}_{L_r^j}, \Delta \text{OMC}_{L_r^k}, \Delta \text{OMC}_{L_r^l}$ 分别为第 i 颗 GPS 卫星, 第 j 颗 GLONASS 卫星, 第 k 颗 Galileo 卫星, 第 l 颗 BDS 卫星的相位观测值与计算值之差的历元间差; $\Delta v_{L_r^i}, \Delta v_{L_r^j}, \Delta v_{L_r^k}, \Delta v_{L_r^l}$ 分别第 i 颗 GPS 卫星, 第 j 颗 GLONASS 卫星, 第 k 颗 Galileo 卫星, 第 l 颗 BDS 卫星的相邻历元间相位观测值残差之差。

对式(4)采用均方根信息滤波方法进行参数估计。需要指出的是接收机钟差是相对量, 对同一系统的所有跟踪站的接收机钟差采用重心基准

$\sum_{r=1}^{n_{\text{sys}}} \Delta \delta t_{r, \text{sys}} = 0$ 进行约束, m_{sys} 为跟踪站到系统 sys 卫星的测站个数。

由式(4)可以得到历元 k 时刻卫星 s 的历元间差分钟差改正数 $\Delta \delta t^s(k)$, 则历元 k 时刻卫星 s 的钟差改正数为:

$$\delta t^s(k) = \delta t^s(i_0) + \sum_{i=i_0+1}^k \Delta \delta t^s(i) \quad (5)$$

式中, i_0 为卫星 s 初始历元; $\delta t^s(i_0)$ 为初始历元 i_0 对应的卫星钟差改正数; $\Delta \delta t^s(i)$ 为历元 i 对应的卫星钟差改正数历元间差。

由式(2)可得历元 k 时刻的非差伪距观测值误差方程为:

$$v_{P_r^s(k)} = c(\delta t_r(k) - \delta t^s(k)) + m_r^s(k) dT_r - \text{OMC}_{P_r^s(k)} \quad (6)$$

由历元间差分相位观测值可以得到的非常精确的对流层延迟误差和历元间差分卫星钟差^[4-5]。将式(3)求得的 dT_r 和式(5)带入式(6), 可得:

$$v_{P_r^s(k)} = c(\delta t_r(k) - \delta t^s(i_0)) - \text{omc}_{P_r^s(k)} \quad (7)$$

式中

$$\text{omc}_{P_r^s(k)} = c \sum_{i=i_0+1}^k \Delta \delta t^s(i) - m_r^s(k) dT_r + \text{OMC}_{P_r^s(k)}$$

历元间差分方法同时对相位与伪距观测值进行了差分, 由式(5)可以看出, 求得的卫星钟差受到 $\delta t^s(i_0)$ 的影响, 当采用导航星历进行计算时, 会导致数十纳秒的偏差^[2,4-5]。

式(7)可看做利用精确求得的卫星钟变化来平滑伪距残差,因此 $\delta t^s(i_0)$ 经过一段时间才会收敛,才能被用于卫星钟差的计算,经测试,收敛时间大概需要 20 分钟。

本文在文献[5]的基础上,利用式(7),对同一系统同一测站观测到的卫星 s 、 t 进行星间做差,消除接收机钟差可得:

$$v_{P_{st}(k)} = c(\delta t^t(i_0) - \delta t^s(i_0)) - \text{omc}_{P_{st}(k)} \quad (8)$$

式中, $\delta t^t(i_0)$ 和 $\delta t^s(i_0)$ 分别为卫星 t 和 s 在历元 i_0 对应的卫星钟差改正数; $\text{omc}_{P_{st}(k)} = \text{omc}_{P_t(k)} - \text{omc}_{P_s(k)}$; $v_{P_{st}(k)}$ 为卫星 t 和 s 在历元 k 对应的伪距观测值残差星间差。

式(8)与测站无关,采用最小二乘估计即可得到相应卫星的初始时刻钟差改正数 $\delta t^s(i_0)$ 。需要指出的是卫星钟差是相对量,采用重心基准 $\sum_{s=1}^n \delta t^s(i_0) = 0$ 进行约束, n 为历元 i_0 时刻观测到的同一系统卫星个数。

求出卫星 s 初始时刻 i_0 的卫星钟差改正数 $\delta t^s(i_0)$ 后,历元 k 时刻卫星 s 的钟差可以表示为:

$$t^s(k) = t^s(k)_0 + \delta t^s(i_0) + \sum_{i=i_0+1}^k \Delta \delta t^s(i) \quad (9)$$

式中, $t^s(k)_0$ 为历元 k 时刻由导航星历得到的卫星钟差初值; $t^s(k)$ 为历元 k 时刻卫星 s 的钟差。

2 钟差分析与定位验证

2.1 卫星钟差精度分析

为了对本文算法的精度进行分析,采用 2014 年 9 月 17 日(年积日为 260 天)的全球分布的 50 个实测跟踪站数据,基于均方根信息滤波单历元解算多系统卫星钟差,测站分布如图 1 所示。由于 GNSS (Global Navigation Satellite System) 观测值是测站与卫星间的相对时间延迟,所以本文所求的卫星钟差是相对于某基准钟的相对钟差。研究表明,基准钟的精度优于 10^{-6} s,相对钟差和绝对钟差对定位的影响是等价的^[2]。本文为了保证基准钟的钟差精度及实时估计卫星钟差的需要,以所有跟踪站同一系统的接收机钟差的重心基准作为基准钟,本文所求的同一系统的卫星钟差是相对于该基准钟的相对钟差。

本文对估计的多系统卫星钟差的精度评价采用与武汉大学多系统最终精密卫星钟差做二次差的方法。首先,选取同一系统内某一卫星作为参考星,参考星要尽量选择历元数最多的卫星,做差时 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 选择的参考

星依次为 G09、R05、E11 和 C01。为了消除卫星钟差估计时基准钟选择的不同产生的影响,将本文估计的卫星钟差与武汉大学卫星钟差中的相应卫星与参考星的钟差做一次差。然后将计算结果与武汉大学的结果做二次差,这样做可以有效地反映出本文估计的卫星钟差与武汉大学最终精密卫星钟差之间的符合程度^[2,4-5]。图 2~图 4 分别为 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 系统卫星钟差与武汉大学最终精密卫星钟差二次差的均方根 (root mean square, RMS)。从中可以看出,采用本文算法求得的 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 卫星钟差与武汉大学最终精密卫星钟差二次差的均方根都优于 0.2 ns,其中 GPS 所有卫星钟差二次差均方根的平均值为 0.145 ns, GLONASS 所有卫星钟差二次差均方根的平均值为 0.188 ns, BDS 和 Galileo 卫星钟差二次差均方根的平均值为 0.139 ns。

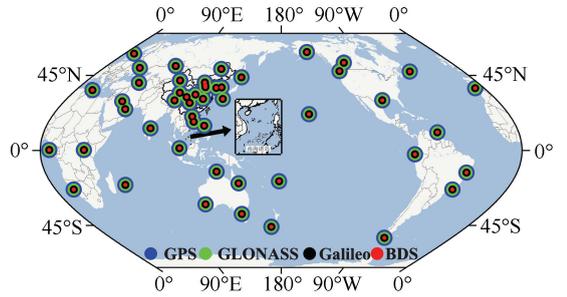


图 1 GNSS 测站分布(地图上中国国界依据中国地图(中国地图出版社出版 1:60 万, ISBN9787503154032,审图号 GS(2009)299)

Fig.1 Distribution of GNSS Tracking Stations

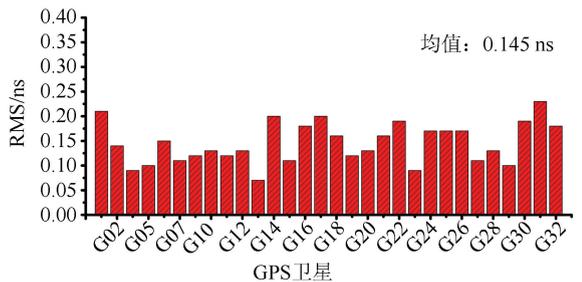


图 2 GPS 卫星钟差精度

Fig.2 Accuracy of GPS Satellites Clock Offsets

2.2 精密单点定位结果分析

为了验证算法的正确性,将估计的多模卫星钟差应用于 PPP 动态定位,并与武汉大学最终精密卫星钟差的定位结果比较。为了排除轨道因素的影响,不同卫星钟差定位解算时,卫星轨道都固定为武汉大学最终精密卫星轨道。选取了多模跟踪站九峰站进行定位试验,本文估计卫星钟差时未使

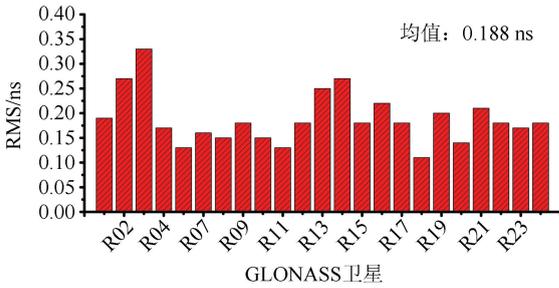


图3 GLONASS 卫星钟差精度

Fig.3 Accuracy of GLONASS Satellites Clock Offsets

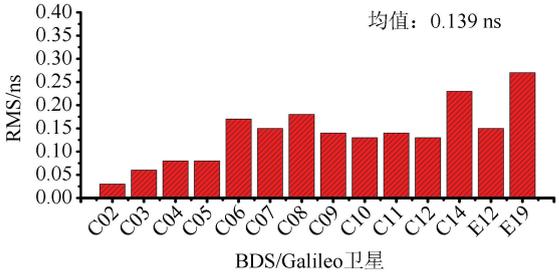


图4 BDS 和 Galileo 卫星钟差精度

Fig.4 Accuracy of BDS and Galileo Satellites Clock Offsets

用该站数据,采用 GPS、GPS/GLONASS、GPS/BDS、GPS/GLONASS/BDS 和 GPS/GLONASS/BDS/Galileo 5 种不同的动态定位模式,统计了东、北和高三个分量偏差的均方根,从第 3 小时开始进行精度统计以保证三个方向上偏差小于 10 cm。

图 5 和图 6 分别为采用武汉大学最终精密钟差和本文估计的精密钟差的定位结果。从中可以看出,对于九峰站,本文估计的 GPS 卫星钟差的定位结果优于武汉大学卫星钟差的定位结果,这主要是因为实验所用的跟踪站在中国境内比较集中,估计的卫星钟差更适用于该区域内测站。无论是对于本文估计的卫星钟差还是武汉大学的卫星钟差,多系统融合定位精度都得到了极大提高,GPS/BDS、GPS/GLONASS/BDS 融合定位平面精度优于 1 cm,高程方向优于 3 cm,由于 Galileo 卫星数较少,GPS/GLONASS/BDS/Galileo 四系统融合定位相对于 GPS/GLONASS/BDS 融合定位没有明显提高。另外,除了 GPS,基于本文估计的卫星钟差的其余四种定位模式的定位结果与基于武汉大学的卫星钟差的定位结果差距在 1 cm 左右,这一方面可能是由于历元间差分观测值测量噪声变大,估计的卫星钟差精度比基于非差模式的钟差略差,另一方面可能是由于武汉大学估计多系统卫星轨道和钟差时用到九峰站的数据,该站定位结果与武汉大学最终精密卫星钟差

内符合性较好。

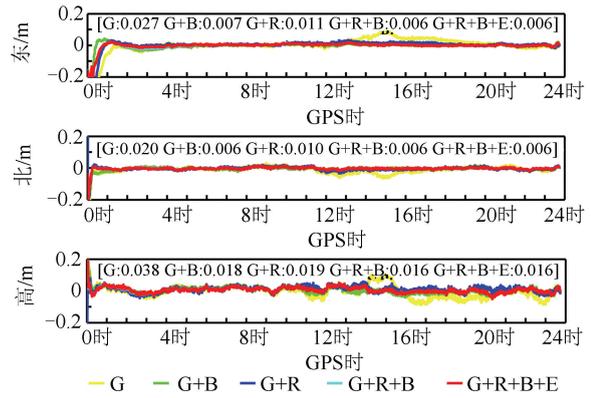


图5 基于武汉大学最终精密钟差的九峰站动态精密单点定位结果

Fig.5 Multi-GNSS PPP Results with Satellites Clock Offsets Generated by Wuhan University

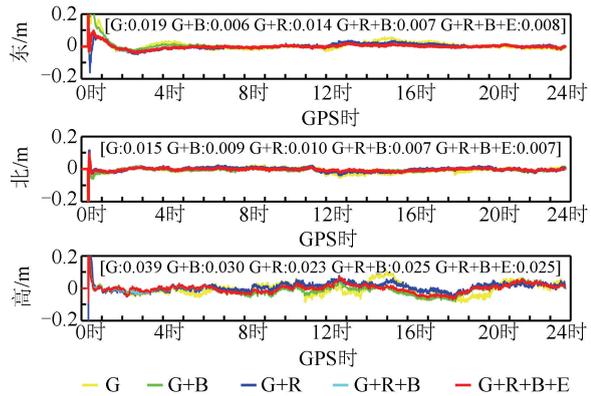


图6 基于本文估计的精密钟差的九峰站动态精密单点定位结果

Fig.6 Multi-GNSS PPP Results with Satellites Clock Offsets Estimated in this Article

3 结 语

本文多模卫星钟差估计分为两步。首先,采用历元间差分相位观测值求解精确的卫星钟差变化和对流层湿延迟改正;然后,采用非差伪距观测值求解初始时刻卫星钟差改正数。本文不需要采用并行计算的方法,待初始时刻卫星钟差改正数收敛以后即可获得高精度的多模卫星钟差。由于相位观测值历元间差分消除了模糊度参数,而伪距观测值星间差分消除了接收机钟差参数,在保证卫星钟差精度的基础上,提高了计算效率,该算法非常适合应用于多系统实时卫星钟差估计。

基于本文算法得到的多模精密卫星钟差与武汉大学最终精密卫星钟差互差优于 0.2 ns。精密单点定位结果显示与利用武汉大学最终精密产品的定位结果精度相当,说明基于该算法得到的多

模精密卫星钟差完全可以满足高精度导航定位用户的需要。

参 考 文 献

- [1] Ge M, Chen J, Gendt G, et al. EPOS-RT: Software for Real-time GNSS Data Processing[C]. EGU General Assembly Conference, Vienna: Austria, 2009
- [2] Cai Hua, Zhao Qile, Lou Yidong, et al. Implementation and Precision Analysis of GPS Precise Clock Estimation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1 293-1 296(蔡华, 赵齐乐, 楼益栋, 等. 精密卫星钟差确定系统的实现与精度分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, 34(11): 1 293-1 296)
- [3] Mervart L, Lukes Z, Rocken C, et al. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-time [C]. ION GNSS, Savannah, USA, 2008
- [4] Zhang X, Li X, Guo F, et al. Satellite Clock Estimation at 1 Hz for Real-Time Kinematic PPP Applications[J]. *GPS Solutions*, 2009, 15(4): 315-324
- [5] Ge M, Chen J, Douša J, et al. A Computationally Efficient Approach for Estimating High-rate Satellite Clock Corrections in Real-time[J]. *GPS Solutions*, 2011, 16(1): 9-17
- [6] China Satellite Navigation Office BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal BII (Version1.0) [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2012
- [7] Shi C, Zhao Q, Li M, et al. Precise Orbit Determination of Beidou Satellites with Precise Positioning [J]. *China Science: Earth Sciences*, 2011, 42(6): 854-861
- [8] Li M, Qu L, Zhao Q, et al. Precise Point Positioning with the BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 927-943
- [9] Zhao Q, Guo J, Li M, et al. Initial Results of Precise Orbit and Clock Determination for Compass Navigation Satellite System[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 475-486

Multi-GNSS Satellites Clock Estimation and Analysis

QU Lizhong^{1, 2, 3} DU Mingyi^{1, 2} WANG Jiang^{1, 2} ZHAO Qile³ GUO Jing³

1 School of Geomatics and Urban Spatial Information, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102600, China

2 Beijing Key Laboratory for Architectural Heritage Fine Recon Structure & Health Monition, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102600, China

3 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: By improving the satellites clock offsets estimation method with epoch-differenced phase and un-differenced pseudo-range observations, we realize the estimation of GPS, GLONASS, BDS, and Galileo satellites clock offsets. Moreover 50 GNSS stations distributed worldwide were used to acquire multi-GNSS satellites clock offsets. Their precisions were analyzed. PPP was used to validate the estimated satellite clock offsets. The experimental results illustrate that the biases between satellites clock offsets as estimated and the final multi-GNSS precise satellites clock offsets generated using PANDA software package of Wuhan University were less than 0.2 ns. The PPP results using the estimated satellites clock offsets were close to the results estimated using the final multi-GNSS satellites clock offsets generated with the Wuhan University PANDA software.

Key words: multi-GNSS; epoch-differenced phase and un-differenced pseudo-range observations; precise satellites clock estimation; PPP

First author: QU Lizhong, PhD, specializes in GNSS high-precision data process. E-mail: qulizhong@whu.edu.cn

Corresponding author: GUO Jing, PhD. E-mail: jingguo@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41374034; the National ‘863’ Projects, No. 2014AA123101; The International GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS); the special funds for central university basic scientific research, No. 2042014gf026.