

Densification of GNSS Precise Satellite Clock Corrections

Yize Zhang^{1,2}, Junping Chen², Jiexian Wang^{1,3}, Xiao Pei^{1,2}, Haojun Li²

1. Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai, China

2. Shanghai Astronomical Observatory (SHAO), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai, China

3. Key Lab of Advanced Surveying Engineering of SBSM, Shanghai, China

1. zhyize@163.com

Abstract: Satellite clocks are key products for user PPP positioning. IGS and its ACs provide the most precise clocks based on global GNSS networks. The estimation of satellite and receiver clocks is much time consuming and most IGS ACs set the clock sampling to 5 minutes. However, more and more PPP applications like LEO POD require high frequency satellite clocks. To fulfill this requirement, we develop a clock densification tool to resample the satellite clocks. The strategy is based on epoch-difference method. Firstly, the epoch-difference satellite clock corrections are estimated using ionosphere-free phase combination from a GNSS network. The epoch-differenced satellite clocks, sampled at 30 s, are then combined with 5 min absolute clocks to derive absolute clocks with 30 s sampling. Comparing the densified clocks to the IGS final precise clocks, the result shows that the precision of absolute clocks is better than 11 ps, and is at 8 ps for satellite-differenced clocks. So we use this method to densify the 5 min clock corrections provided by SHAO GNSS AC to 30 s.

Keywords: precise satellite clock correction; epoch-difference; high sampling rate; densification; Precise Point Positioning

基于历元间差分的GNSS精密卫星钟差加密

张益泽^{1,2}, 陈俊平², 王解先^{1,3}, 裴霄^{1,2}, 李浩军²

1. 同济大学测量与国土信息工程系 上海 200092

2. 中国科学院上海天文台 上海 200030

3. 现代工程测量国家测绘局重点实验室 上海 200092

1. zhyize@163.com

【摘要】在全球GNSS观测网中采用无电离层组合相位观测值进行历元间差分,固定站坐标、对流层天顶延迟、卫星轨道,估计了测站和卫星的历元间钟差,以IGS提供的5min采样率的钟差为试验,将其加密到30s,将加密结果与IGS的30s采样率的最终精密卫星钟差进行比较。结果表明,这种方法得到的卫星钟差精度约为11ps,星间相对钟差精度约为8ps,足以满足厘米级精密单点定位以及低轨卫星精密定轨的要求。最后利用此方法将上海天文台GNSS分析中心提供的5min采样率的卫星钟差加密到30s,并研究了加密结果对动态精密单点定位的影响。

【关键词】精密卫星钟差; 历元间差分; 高采样率; 加密; 精密单点定位

1 引言

精密单点定位(PPP)是近十几年兴起的一门新的GNSS技术,只需单站双频观测数据并利用精密卫星轨道、卫星钟差就可以实现高精度定位^[1],因此,被广泛应用于参考框架的维持、低轨卫星定轨、大气研究等^[2-5]。然而,由于PPP采用非差相位和伪距进行定位,无法像相对定位那样完全消去卫星轨道和钟差的误差,因此必须使用高精度的卫星轨道和钟差改正信息^[6]。目前IGS提供了15min间隔的精密卫星星历,通过滑动式多项式内插卫星星历,并不影响其精度。然而,精密卫星钟差的确定是制约精密单点定位的一个重要因素^[6-7],常规的卫星钟差估计方法^[8]由于估计

参数较多,若直接估计30s、5s采样间隔的卫星钟差,比较耗时^[9],并且IGS各分析中心一般只提供5min采样间隔的卫星钟差。为了满足高采样率用户,尤其是高动态用户所需,需对卫星钟差进行加密。但由于卫星钟差的非线性项变化不稳定,通过常规内插方法(三次样条插值,线性内插,Lagrange插值等)将5min的卫星钟差加密到30s的精度只有0.1~0.15ns^[2,10-11]。为了得到高精度的精密卫星钟差,本文采用历元间差分技术进行高精度GNSS卫星钟差的加密,该方法已经用在了上海天文台GNSS数据分析中心^[12]估计的5min采样间隔的卫星钟差加密中。

2 历元间差分加密卫星钟差

2.1 历元间钟差解算

在 t_i 时刻, 测站 k 对卫星 J 的相位观测方程为:

$$L_{fk}^j(t_i) = \rho_{fk}^j(t_i) + c \cdot \delta_k(t_i) - c \cdot \delta^j(t_i) + \delta_{k, trop}^j(t_i) + \lambda_f \cdot N_k^j + \varepsilon_{fk}^j(t_i) \quad (1)$$

式(1)中, $L_{fk}^j(t_i)$ 表示相位观测值, $\rho_{fk}^j(t_i)$ 表示站星几何距离, $\delta_k(t_i)$ 、 $\delta^j(t_i)$ 分别为接收机钟差和卫星钟差, $\delta_{k, trop}^j(t_i)$ 、 $\delta_{fk, iono}^j(t_i)$ 为对流层延迟和电离层延迟, N_k^j 为整周模糊度, c 、 λ_f 是光速和波长, $\varepsilon_{fk}^j(t_i)$ 为其他误差项, 包括潮汐改正及其它未被模型化的误差。

在卫星钟差估计中, 一般采用LC组合消去电离层延迟。

$$L_{IF,k}^j(t_i) = \rho_{fk}^j(t_i) + c \cdot \delta_k(t_i) - c \cdot \delta^j(t_i) + \delta_{k, trop}^j(t_i) + \lambda_{IF} \cdot N_{IF,k}^j + \varepsilon_{IF,k}^j(t_i) \quad (2)$$

在同一个测站, 若某颗卫星没有发生周跳, 对这颗卫星进行历元间差分, 可以消去模糊度参数:

$$\Delta L_{IF,k}^j(t_{i+1,i}) = \Delta \rho_{fk}^j(t_{i+1,i}) + c \cdot \Delta \delta_k(t_{i+1,i}) - c \cdot \Delta \delta^j(t_{i+1,i}) + \Delta \delta_{k, trop}^j(t_{i+1,i}) + \varepsilon_{IF,k}^j(t_{i+1,i}) \quad (3)$$

在加密卫星钟差时, 一般采用固定测站坐标、卫星位置和对流层天顶延迟的方法, 因此式(3)可以改写成:

$$\Delta L_k^j(t_{i+1,i}) = c \cdot \Delta \delta_k(t_{i+1,i}) - c \cdot \Delta \delta^j(t_{i+1,i}) + l_k^j(t_{i+1,i}) \quad (4)$$

式(4)中, 只有历元间测站钟差之差 $\Delta \delta_k(t_{i+1,i})$ 和卫星钟差之差 $\Delta \delta^j(t_{i+1,i})$ 是待估参数。理论上, 根据式(4)对多个测站进行历元间相位差分, 就可以求出历元间卫星钟差变化。但式(4)是秩亏的, 因为需要选定一个时间基准。目前IGS分析中心通常采用所有卫星钟差之和为零来确定时间基准, 但这种方法较为麻烦^[1]。可以选用钟差变化稳定性较好的测站钟, 以其历元间钟差之差为基准, 进而估计出各卫星在历元间的钟差变化。

忽略历元间的相关性, 可得到历元间各卫星钟差之差的中误差 $\sigma_{\Delta \delta(t_{i+1,i})}$, 可用于后面的卫星钟差加密。

2.2 卫星钟差加密

历元间卫星钟差之差确定后, 只要选定参考历元的卫星钟差, 就可以得到相应各历元的卫星钟差。为了将卫星钟差从5min加密到30s, 可将5min采样间隔的

卫星钟差作为约束条件, 对每颗卫星进行加密。由2.1中得到的历元间卫星钟差之差, 有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta(t_1) = \delta_{fix}(t_1) \\ -\delta(t_1) + \delta(t_2) = \Delta \delta(t_{2,1}) \\ \quad -\delta(t_2) + \delta(t_3) = \Delta \delta(t_{2,1}) \\ \quad \quad \quad \dots \\ \quad \quad \quad -\delta(t_{i-1}) + \delta(t_i) = \Delta \delta(t_{i,i-1}) \\ \quad \quad \quad \delta(t_i) = \delta_{fix}(t_i) \end{array} \right. \quad (5)$$

忽略历元间的相关性, 根据2.1中得到的历元间卫星钟差之差的中误差 $\sigma(t_{i+1,i})$ 对式(5)中的观测方程进行定权:

$$P_{\Delta \delta(t_{i+1,i})} = \frac{\delta_0^2}{\sigma_{\Delta \delta(t_{i+1,i})}^2} \quad (6)$$

在卫星钟差加密时, 将5min采样率的卫星钟差视为“真值”, 对观测方程进行绝对约束。根据最小二乘原理, 即可得到30s间隔的卫星钟差。

3 数据试验

上一节介绍了利用历元间相位差分对卫星钟差加密的原理, 为了验证该方法的正确性和可行性, 本节将利用实际数据对卫星钟差进行加密。

3.1 数据选取

选择2011年年积日为199、200、201连续三天的数据, 将这三天的5min采样率的卫星钟差加密到30s。加密时采用IGS提供的卫星轨道、测站坐标和对流层天顶延迟, 并将其固定。选取全球107个均匀分布的IGS站的观测数据, 按照上一节介绍的方法, 对其进行加密。

3.2 加密后的卫星钟差

为了进行比较, 将IGS提供的30s采样率的卫星钟差视为“真值”, 将加密后的卫星钟差与“真值”进行比较, 并统计其RMS, RMS可表示为:

$$RMS = \sqrt{\frac{(\delta - \delta_{IGS})^2}{n}} \quad (7)$$

以DOY200为例, 图1是2号卫星加密后的30采样率的钟差与IGS提供的30s采样率的卫星钟差的差值, 图2是这一天各卫星的RMS统计结果 (PRN01由于故障停止服务)。

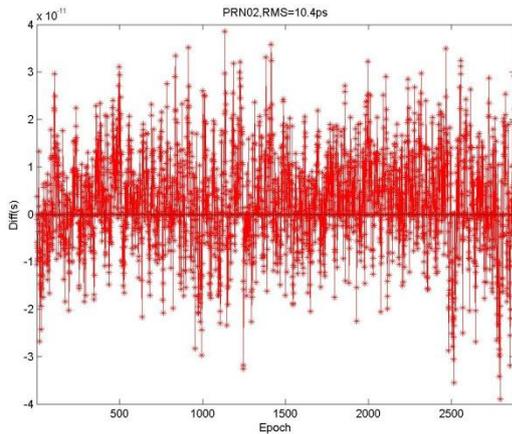


Figure 1. Clock corrections error of PRN02

图 1. PRN02 钟差误差

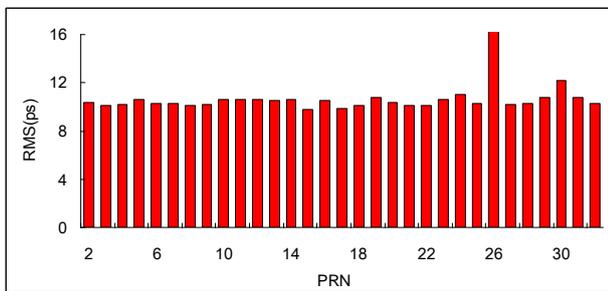


Figure 2. Statistics of RMS of satellite clock corrections

图 2. 卫星钟差统计

从图1和图2中可以看出，加密得到的精密卫星钟差与IGS的最终精密卫星钟差相比，最大差异不超过40ps，除了个别卫星外，RMS值一般为10~11ps。DOY199、200的统计结果在这里没有表示出来，但也得到了同样的结果。加密得到的卫星钟差的精度远高于常规的卫星钟差内插的精度（0.1~0.15ns）。

3.3 加密后的星间钟差

相关文献已经证明，只要保证基准钟的精度高于 10^{-6} s，卫星间相对钟差和绝对钟差的定位效果是等价的^[1]。将加密后的相对卫星钟差与IGS的相对卫星钟差进行比较，可以得到相对卫星钟差的RMS，RMS可表示为：

$$RMS = \sqrt{\frac{(\Delta\delta^{i,j} - \Delta\delta_{IGS}^{i,j})^2}{n}} \quad (8)$$

将PRN02作为参考卫星，计算其他各卫星与PRN02的相对卫星钟差。图3是DOY201这一天相对卫星钟差的RMS统计结果。

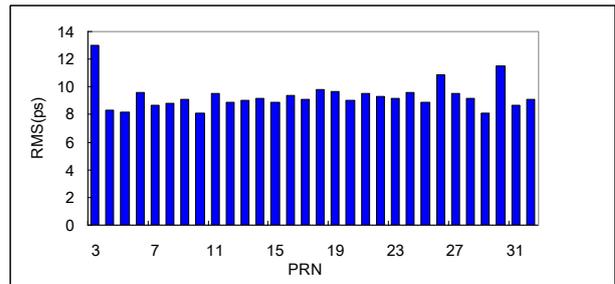


Figure 3. Statistics of RMS of satellite-difference clock corrections

图 3 卫星间相对钟差统计

从图3可以看出，加密后的卫星相对钟差与IGS的相对钟差相比，除个别卫星外，RMS一般为8~9ps，其他两天的加密结果也得到了同样的结论。这样的卫星钟差加密结果足以满足厘米级精密单点定位的要求。

4 加密结果用于动态PPP中

GNSS卫星钟差影响PPP定位结果的精度，要提高PPP定位尤其是高频动态PPP的定位精度结果，应采用高采样率的卫星钟差产品^[5]。

上一节从内符合精度分析了卫星钟差加密的结果。为了验证该方法得到的精密卫星钟差能满足厘米级PPP的要求，笔者用该方法将上海天文台GNSS数据分析中心提供的5min采样率的卫星钟差加密到30s，将加密后的卫星钟差用于动态PPP中，考察加密得到的卫星钟差对动态PPP精度的影响。

按照前面述及方法将上海天文台 GNSS 数据分析中心 2011 年年积日为 200 的 5min 采样率的卫星钟差加密到 30s，并对钟差结果进行动态 PPP，将定位结果与直接采用 5min 采样率的卫星钟差进行动态 PPP 的结果进行比较。图 4 显示了两种方法进行动态 PPP 后的点位误差。

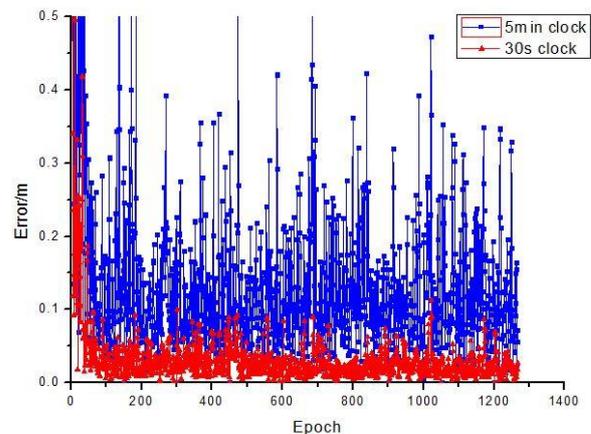


Figure 4. 30s interval and 5min interval clocks in PPP

图 4 加密前后动态 PPP 的结果比较

从图 4 可以看出, 利用加密后的 30s 的精密卫星钟差进行动态 PPP, 当模糊度固定后, 点位误差一般在 0.05m 以内, 明显好于直接采用 5min 间隔的卫星钟差的结果, 这说明加密后的卫星钟差有利于提高高频动态 PPP 的精度。另外, 从图中也可以看出, 采用 30s 采样率的精密卫星钟差, 其 PPP 收敛速度比 5min 的快很多。

5 结语

本文采用基于历元间差分的方法进行精密卫星钟差加密, 该方法与常规的高采样率卫星钟差估计方法比较, 大大减少了估计的参数个数, 提高了高采样率卫星钟差计算的效率, 同时该方法得到的加密结果的精度远高于简单的钟差内插加密。通过试验证明了这种加密方法的高效率性和高精度性

同时, 将上海天文台 GNSS 数据分析中心 5min 采样率的卫星钟差加密到 30s, 将其用于动态精密单点定位中, 证明了这种加密方得到的卫星钟差能大大提高精密单点定位的精度, 并加快收敛速度。

致谢

感谢 IGS 提供的丰富的试验数据和产品。

References (参考文献)

- [1] Ye Shirong. Theory and its Realization of GPS Precise Point Positioning Using Un-differenced Phase[D]. Wuhan: Wuhan University (Ch).叶世榕, GPS非差相位精密单点定位理论与实现[D], 武汉: 武汉大学, 2002.
- [2] Han Baomin, Densification Methods of GPS Satellite Errors and Their Impact on Orbit Determination Precision of LEOs[J], *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006,31(12), P1075-1078(Ch).韩保民, 精密卫星钟差加密方法及其对星载GPS低轨卫星定轨精度影响[J], 武汉大学学报·信息科学版, 2006,31(12), P1075-1078.
- [3] Li H., Chen J., Wang J., et al. Network based Real-Time Precise Point Positioning. *Adv Space Res*,2010,46(9):1218-1224.
- [4] Li H., Wang J., Chen J., et al. The realization and analysis of GNSS Network based Real-Time Precise Point Positioning. *Chinese Journal of Geophysics*,2010,53(6),1302-1307.
- [5] Yi Chonghai, Zhu Jianjun, et al. An Improved Satellite Clock Bias Determination Method of High Sampling Rate[J], *Journal of Geodesy and Geodynamics*. 2010,30(6), P71-76(Ch).易重海, 朱建军等, 一种改进的高采样率卫星钟差求解方法[J], 大地测量与地球动力学, 2010,30(6), P71-76.
- [6] Zumberge JF, Heflin MB, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J Geophys Res*. 1997,102(B3),P5005-5017.
- [7] Li Haojun, Wang Jiexian, et al. Precise Clock Error Estimation of GNSS Satellite and Analysis Based on GNSS Network[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010,35(8), P1001-1003(Ch).李浩军, 王解先等, 基于GNSS网络的卫星精密钟差估计及结果分析[J], 武汉大学学报·信息科学版, 2010,35(8), P1001-1003.
- [8] Hugentobler R, Rolf D, Fridez P. Bernese GPS Software Version 5.0 Draft[M]. Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2004.
- [9] H. Bock, R. Dach, et al. High-rate GPS clock corrections from CODE: support of 1 Hz application. *J Geod*. 2009,83, P1083-1094.
- [10] Hong Ying, Ou Jikun, et al. Three Interpolation for Precise Ephemeris and Clock Offset of GPS satellite[J].*Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2006,31(6),P516-518(Ch).洪樱, 欧吉坤等, GPS卫星精密星历和钟差三种内插方法的比较[J], 武汉大学学报·信息科学版, 2006,31(6), P516-518.
- [11] Guo Dongmei, Han Baomin, et al. Interpolation of Satellite Clock Bias in Low Earth Orbits Determination[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007,27(2), P103-106(Ch).郭东美, 韩保民等, 低轨卫星定轨中精密卫星钟差的插值方法[J], 大地测量与地球动力学, 2007,27(2), P103-106.
- [12] Shanghai Observatory GNSS Analysis Center: www.shao.ac.cn/shao_gnss_ac. 上海天文台 GNSS数据分析中心.