

基于 IGU 预报轨道实时估计精密卫星钟差^{*}

李黎¹⁾ 匡翠林¹⁾ 朱建军¹⁾ 陈永奇^{1,2)}

(¹⁾中南大学测绘与国土信息工程系,长沙 410083)
(²⁾香港理工大学土地测量与地理资讯学系,香港)

摘要 针对目前实时精密单点定位中, GPS 卫星实时钟差服务所存在的精度问题,提出了一种基于 IGU 轨道的实时钟差估计方法。该方法基于 IGU 轨道,采用全球参考站非差载波相位观测值,进行实时钟差估计。数值结果表明:实时估计的卫星钟差与 IGS 最终产品的偏差大部分小于 0.3 ns,平均优于 0.2 ns;采用估计所得的实时钟差进行 PPP 静态定位,其精度可达 1~2 cm,同时也可得到毫米级精度的天顶对流层延迟。

关键词 实时;卫星钟差估计;精密单点定位;IGU 数据产品;预报轨道

中图分类号:P228 文献标识码:A

REAL-TIME ESTIMATION OF PRECISE SATELLITES CLOCK BIAS BASED ON IGU PREDICTED ORBIT

Li Li¹⁾, Kuang Cuilin¹⁾, Zhu Jianjun¹⁾ and Chen Yongqi^{1,2)}

(¹⁾Department of Survey Engineering and Geomatics, Central South University, Changsha 410083
(²⁾Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract Aiming at the accuracy of the GPS satellite clock bias service the real-time precise point positioning (PPP) currently, a method for real-time estimating the satellite clock bias based on the basis of IGU (IGS Ultra-rapid) predicted orbits is put forward. In this method the un-differenced carrier phase observations of global reference stations is used to estimate the real-time clock bias. Numerical calculation results show that most of deviations between the estimated satellite clock bias and the IGS final product are less than 0.3 ns, and the average accuracy is better than 0.2 ns; with the real-time estimated satellite clock bias, the static accuracy of PPP can achieve 1-2 cm, but also the accuracy of zenith tropospheric delay (ZTD), can reach to millimeter level.

Key words: real-time; satellite clock estimation; precise point positioning; IGU data product; predicted orbit

1 引言

实时 GPS 精密单点定位 (PPP) 技术必须使用实时的卫星精密星历和钟差^[1]。目前,国际上只有几个机构能够提供近实时轨道及钟差产品,比如美国喷气推进实验室 (JPL)、加拿大自然资源部 (NR-Can), 以及欧洲空间局 (ESA)。JPL 的产品作为一

种商业产品,以网络传输和卫星传输两种方式发给用户,其时延为 5 s^[2]。ESA 和 NRCAN 的实时轨道和钟差产品基于 IGS 实时试用工程 (IGS-RTTP) 所产生,目前还没有提供公众服务^[3]。IGS 已经开始提供实时的 IGS 预报产品,其预报轨道 (IGU) 精度与 IGS 的最终轨道几乎相当^[4]。然而,由于 GPS 卫星所携带的铷钟和铯钟易受钟噪声和频移的影响,

* 收稿日期:2010-09-13

基金项目:国家自然科学基金(40974007,41004012);中南大学前沿研究计划(2009QZZD002)

作者简介:李黎,1981年生,男,博士研究生,现主要从事 GPS 精密定位和 GPS 气象学方面的研究。E-mail:gszl.lili@gmail.com

致使其变化的复杂性难以进行模型化并做出准确预报,因此,其对应的预报产品精度较低。目前的IGU预报钟差及其时钟漂移与IGS最终钟差相比,偏差达数十厘米甚至数米,这种精度的钟差产品不能满足一些高精度的PPP应用要求。

国内早期对于GPS卫星钟差的研究,大多集中于产品精度分析及预报研究^[5,6]。随着大地测量学及其相关学科的发展和需要,高精度实时精密单点定位技术成了当前GPS定位研究的主要内容之一。近年来,对于相应实时卫星钟差的研究成了实现实时精密单点定位的重点内容。实时卫星钟差估计主要采用非差与历元间差分两种模型,就其估计精度来说,非差模型的卫星钟差估计精度优于历元间差分模型的结果^[7]。但由于非差模型中模糊度参数的存在,其估计速度要慢于历元间差分模型,因为历元间差分模型消除了模糊度参数,不存在收敛过程^[8]。在实际应用中,可以使用模糊度收敛之后的卫星估计钟差。

本文基于GPS参考站网络数据和IGU轨道,采用非差无电离层载波相位组合观测值,应用扩展卡尔曼滤波进行近实时高精度卫星钟差估计研究,并从不同层面对所估计的钟差进行了精度比较分析。

2 卫星钟差实时估计原理

2.1 基于IGU预报轨道的卫星钟差估计策略

每个IGU文件包括48小时的数据,其中前24小时基于最新实测数据得到,后24小时为预报值。从表1可以看出,IGU观测部分的轨道和钟差精度约为3 cm和0.2 ns,IGU预报部分的轨道精度约为5 cm,随着时间的外推,轨道精度会进一步降低到10 cm左右,而其预报钟差的精度降低得更快,大约为3 ns(~0.9 m),基于此的轨道和钟差并不能满足高精度PPP定位及相关应用的精度要求^[9]。

表1 IGU轨道与钟差产品信息

Tab.1 IGU orbit and clock products

产品	精度	时延(小时)	更新时间	数据间隔(分钟)
IGU 预报部分				
· 轨道	~5 cm	实时	03,09,15,21	15
· 钟差	~3 ns		UTC	15
IGU 观测部分				
· 轨道	~3 cm	3~9	03,09,15,21	15
· 钟差	~0.2 ns		UTC	15

IGU产品每6小时更新一次,滞后3小时发布,这就意味着实时用户需要3~9小时的预报轨道和钟差。在本研究中,将使用第30~36小时的数据,

即预报部分的第6~12小时数据。选择这部分数据主要是考虑到IGU产品的发布也许滞后不止3小时(图1)。

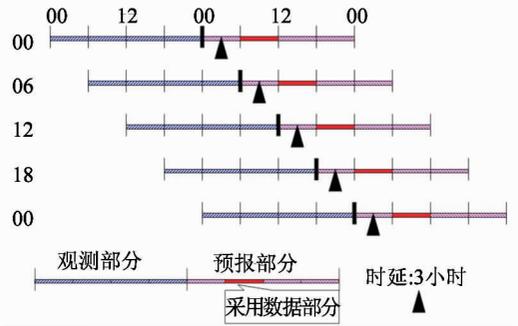


图1 IGU轨道产品应用图示

Fig.1 Diagram of application of IGU orbit product

图2描述了基于非差技术的近实时卫星钟差估计方法。首先,基于GPS参考站网络的非差观测值数据和IGU预报产品(卫星轨道和ERP)实时估计卫星钟差。再将估计得到的卫星钟差用于实时PPP定位及其他相关应用研究。观测数据必须先经过预处理,包括载波相位观测值周跳探测与修复、粗差数据剔除,以及接收机钟跳的正确识别和处理。除此之外,观测模型还需要做相对论效应、相位缠绕、卫星和接收机的相位中心偏差及其变化、固体潮、海洋潮汐、极移和章动,误差等改正(表2)。

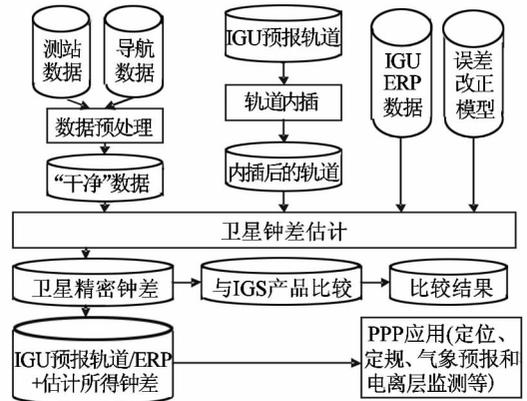


图2 近实时卫星钟差计算流程图

Fig.2 Flow chart of near calculation real-time of satellite clock bias

2.2 非差PPP技术方法

无电离层组合观测方程为^[11,12]:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P(L1) - f_2^2 P(L2)}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - c(dt - dT) + \Delta T + d_{\text{mult}/P(L1+L2)} + \varepsilon(P(L1+L2)) \quad (1)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2 \Phi(L1) - f_2^2 \Phi(L2)}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - c(dt - dT) + \Delta T + \lambda N' + d_{\text{mult}/\Phi(L1+L2)} + \varepsilon(\Phi(L1+L2)) \quad (2)$$

表 2 非差数据处理的误差模型改正^[10]

Tab.2 Error correction models for un-difference data processing

误差改正项	改正模型/方法
模型	估计对流层延迟 ZTD 和水平梯度
对流层延迟 先验模型	Saastamoinen
映射函数	VMF1
卫星天线相位中心	IGS_05.atx
接收机天线相位中心	IGS_05.atx
相位缠绕改正	Wu 模型
相对论效应	IGS 协议(1996 Ch.7)
固体潮汐	IGS 协议(1996 Ch.7)
海洋荷载	NAO.99b (GOTIC2)
极潮/章动	IGS 协议(1996 Ch.7)

式中, $P(Li)$ 是 Li 的伪距观测值, $\Phi(Li)$ 是 Li 的载波相位观测值, ρ 是站星距离, c 是光速, dt 为卫星钟差, dT 是接收机钟差, ΔT 是对流层延迟, λ 是无电离层组合观测值的波长, N' 是无电离层组合观测值的浮点模糊度, $d_{\text{mult}/P(L1+L2)}$ 是伪距测量值的多路径效应, $d_{\text{mult}/\Phi(L1+L2)}$ 是载波相位测量值的多路径效应, $\varepsilon(\cdot)$ 是测量噪声。 ΔT 附有水平梯度的对流层延迟模型描述为^[13]:

$$\Delta T = m(\varepsilon)_h ZHD + m(\varepsilon)_w (ZTD - ZHD) + m(\varepsilon)_{azi} (G_N \cos\phi + G_E \sin\phi) \quad (3)$$

式中, ZTD 为天顶总延迟, ZHD 是天顶干延迟, $(ZTD - ZHD)$ 表示天顶湿延迟, $m(\cdot)$ 为映射函数, ε 是高度角, 下标 h 和 w 各自代表干延迟和湿延迟, azi 代表梯度, ϕ 是方位角, $(G_N \cos\phi + G_E \sin\phi)$ 是梯度向量 (G_N, G_E) 和方位角向量 $(\cos\phi, \sin\phi)$ 的点积。对于梯度映射函数 $m(\varepsilon)_{azi}$, 各方向不均性主要来自水蒸汽, 所以使用湿延迟的映射函数作为梯度映射函数:

$$m(\varepsilon)_{azi} = m(\varepsilon)_w \frac{1}{\tan\varepsilon} \quad (4)$$

2.3 基于参考站网络的卫星钟差滤波估计

基于非差技术的卫星钟差估计, 需要输入的数据包括参考站网络的非差观测数据及其测站坐标, 以及 IGS 精密轨道/ERP 产品。测站坐标使用 IGS 公布的 SINEX 产品或此前一周的 PPP 定位结果; 精密轨道和 ERP 产品, 均使用 IGU 预报产品数据。解算方式采用逐历元卡尔曼滤波, 图 3 为卡尔曼滤波的递推过程^[14]。除采用常规的向前滤波之外, 为提高估计精度, 本文还采用了向后滤波和平滑处理, 后退滤波器/平滑公式为^[15,16]:

$$\bar{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{P}^-(t) + \mathbf{P}_b^-(t))^{-1} (\mathbf{P}^{-1}(t)\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{P}_b^{-1}(t)\hat{\mathbf{x}}_b(t)) \quad (5)$$

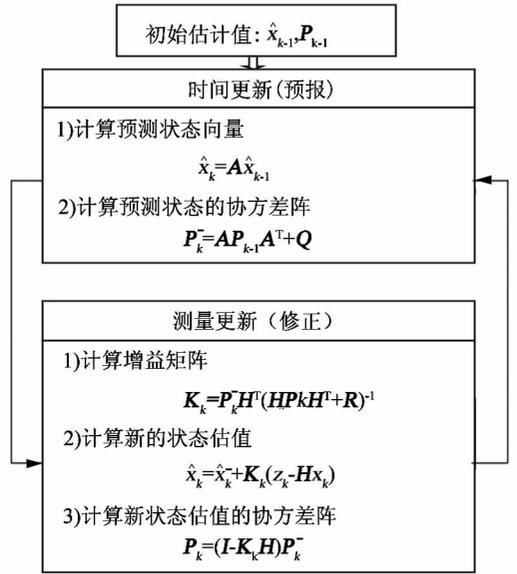


图 3 Kalman 滤波计算流程

Fig.3 Flow chart of Kalman filter calculation

式(5)中, $\bar{\mathbf{x}}(t)$ 为历元 t 的平滑值, $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 为向前滤波值, $\hat{\mathbf{x}}_b(t)$ 为向后滤波值, $\mathbf{P}^{-1}(t)$ 、 $\mathbf{P}_b^{-1}(t)$ 各为向前和向后滤波值对应的协方差阵。Kalman 滤波需要估计的未知向量包括: 卫星时钟参数(钟差 dt 和钟漂 di), 接收机钟差参数 (dT), 天顶总延迟参数 (ZTD), 对流层梯度参数 (G_N, G_E) 和无电离层组合的浮点模糊度参数 N' 。相位观测值的观测噪声设为 0.01 m。滤波状态向量的估计方法、先验标准差和过程噪声的设置如表 3。

表 3 先验标准差、过程噪声设置

Tab.3 Settings for priori standard deviation and process noise

估计参数	先验标准差	过程噪声 (1/sqrt(s))	估计策略
GPS 卫星钟差	1×10^1 m	1×10^{-1} m	白噪声
GPS 卫星钟漂	1×10^{-2} m/s	1×10^{-5} m/s	白噪声
接收机钟差	1×10^1 m	1×10^{-1} m	白噪声
天顶对流层延迟	5×10^{-1} m	1×10^{-5} m	随机游走
水平梯度	1×10^{-3} m	1×10^{-5} m	随机游走
相位模糊度	1×10^{-1} m	1×10^{-5} m	-

在实际应用中, 所有卫星的相对钟差都应该提前精密确定, 而不需要知道绝对的卫星钟差。原因是即使卫星的相对钟差有一些偏差, 只要相对钟差在时间序列上保持为某一常数, 其对定位的精度不产生影响。因此, 这里估计的卫星和接收机钟差为相对于某参考站时钟的相对钟差, 下文讨论的卫星钟差均指相对钟差。

生成的卫星钟差文件采用 SP3 文件格式, 为便于和 IGS 最终产品进行比较, 以 30 s 时间间隔输

出。为了有效地反映出估计钟差与 IGS 最终精密钟差之间的符合程度,需要先消去不同参考站选择对卫星钟差的影响。我们采用的办法是先计算其所有卫星钟差的平均值,再让二者的卫星钟差各自减去其相应的卫星钟差均值,即为二者的钟差各自加入一个偏差值,使得所有卫星钟差的平均值为零。经过上述处理,就可以比较估计卫星钟差和 IGS 产品之间的符合程度。

3 实时估计卫星钟差的精度分析

3.1 卫星钟差精度比较

依据描述的卫星钟差估计策略,基于修改后的数据处理软件 GT,对卫星钟差进行模拟的实时估计。观测数据选择 13 个全球均匀分布 IGS 参考站(图 4),数据采样率为 30s,参考时钟站为 AMC2 站,截止角为 10°,其误差改正模型见表 2,待估参数设置见表 3。

图 5 给出了所有可用卫星(1 号和 5 号卫星在

调试阶段,无观测数据)与 IGS 最终产品偏差的 RMS,从图 5 可以看出,大部分都小于 0.3 ns,平均优于 0.2 ns,基本达到了 IGS 观测部分产品的卫星钟差精度,与 IGS 预报轨道产品精度相当(~5 cm)。

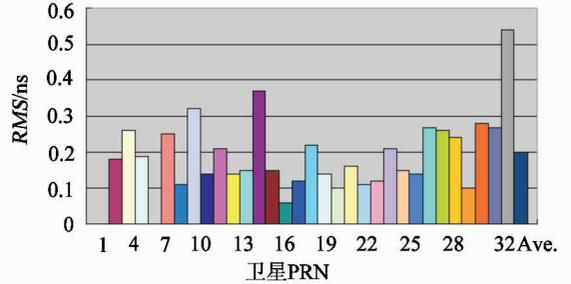


图 5 卫星钟差的 RMS

Fig. 5 RMS of satellite clock bias

图 6 为估计卫星钟差与 IGS 最终产品的较差,限于篇幅,文章仅给出 2、12、22 和 32 号卫星的钟差比较示意图。从图 6 可以看出,偏差基本在 0.2 ns 以内,部分卫星存在日间钟差的跳跃现象,这主要是因为每天的参数(比如模糊度)重置所致。对于每天的钟差也出现了一些跳跃现象,主要与卫星升降以及相应的模糊度重新收敛有关,至于其偏差的变化存在一定的趋势,原因有待进一步深入分析。

3.2 定位精度比较

基于估计所得的卫星钟差,进行 PPP 静态定位,并将其所得坐标与 IGS 发布的 SINEX 产品进行比较(表 4)。同时,也给出了基于 IGS 最终产品和

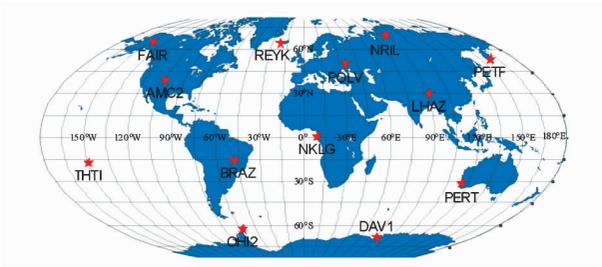
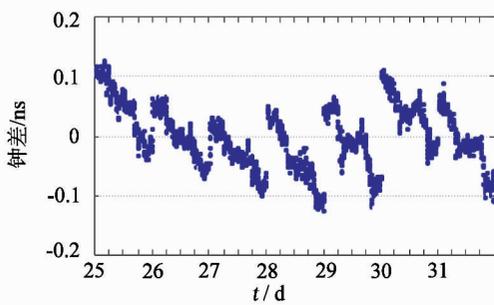
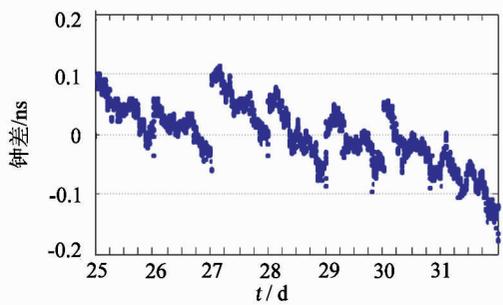


图 4 IGS 参考站分布

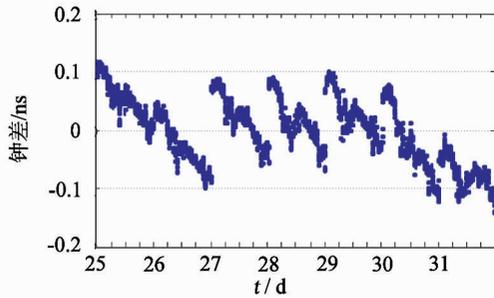
Fig. 4 Distribution of selected IGS reference stations



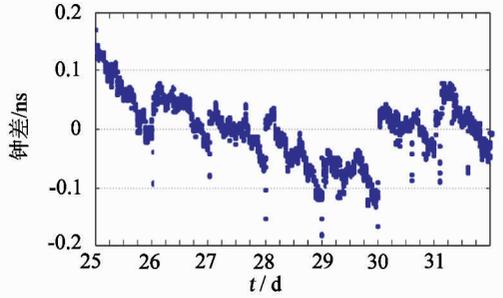
(a)卫星PRN02



(b)卫星PRN12



(c)卫星PRN22



(d)卫星PRN32

图 6 估计卫星钟差与 IGS 产品的较差

Fig. 6 Deviations between estimated of clock bias results and IGS products

IGU 预报产品的 PPP 定位结果。从表 4 可以看出, 基于 IGS 最终卫星钟差的 PPP 定位精度可以达到毫米级, 而基于 IGU 预报钟差的 PPP 定位精度只能达到厘米级, 甚至接近分米级, 且各站精度相差较大 (特别是高程方向), 较不稳定。因此, 基于估计的卫星钟差, 可以获得大约 1 cm 的 PPP 定位精度, 稍差于 IGS 最终卫星钟差结果, 但明显优于 IGU 预报钟差结果。

表 4 3 种卫星钟差计算的定位结果与 SINEX 产品较差的 RMS (单位: m)

Tab. 4 RMS of deviations between the positioning results from three kinds of sat. clock bias and SINEX product (unit: m)

测站	卫星钟差			
	IGS	估计	IGU	
BJFS	北(North)	0.001	0.006	0.008
	东(East)	0.002	0.011	0.030
	高(Up)	0.004	0.009	0.018
KUNM	北(North)	0.005	0.008	0.025
	东(East)	0.011	0.008	0.081
	高(Up)	0.003	0.021	0.049
LHAZ	北(North)	0.004	0.008	0.007
	东(East)	0.002	0.009	0.022
	高(Up)	0.006	0.017	0.011
SHAO	北(North)	0.004	0.009	0.007
	东(East)	0.002	0.008	0.020
	高(Up)	0.005	0.007	0.023
WUHN	北(North)	0.012	0.016	0.005
	东(East)	0.016	0.021	0.031
	高(Up)	0.010	0.005	0.012
平均	北(North)	0.004	0.008	0.019
	东(East)	0.006	0.011	0.033
	高(Up)	0.008	0.016	0.025

3.3 ZTD 精度比较

图 7 给出了基于估计钟差计算的 URUM 站一天的 ZTD 计算结果: 曲线 IGS-ZTD 表示 IGS 公布的 ZTD 产品, 曲线 IGF-ZTD 表示用 IGS 最终产品基于 PPP 计算的 ZTD, 曲线 EST-ZTD 为基于估计钟差计算的 ZTD 结果, 曲线 IGU-ZTD 为基于 IGU 产品计算的 ZTD。从图 7 不难看出, IGS 最终产品计算的 (IGF-ZTD) 和估计钟差计算的 (EST-ZTD) 结果变化趋势基本一致, 它们与 IGS 公布的 ZTD 产品也相差很小, 优于 5 mm。而 IGU 产品计算的 ZTD 变化趋势与 IGS-ZTD 变化相差较大, 在很多时刻两者的较差都超过了 1 cm, 甚至 3 cm 还多。并且由于钟差变动的随机性, 导致了 IGU 预报钟差存在较大的跳跃, 最终造成 IGU-ZTD 也存在不平滑, 有较大的跳跃现象。

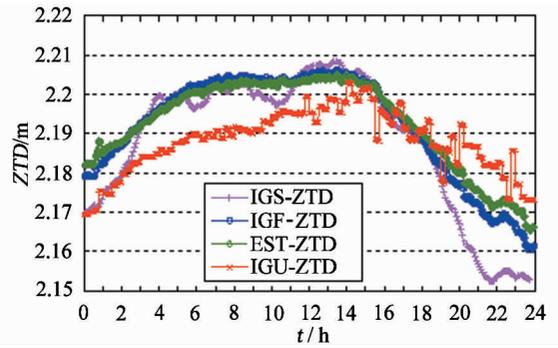


图 7 4 种卫星钟差计算的 ZTD 结果

Fig. 7 Calculated ZTD results from the four kinds of satellite clock bias

需要说明的是, 虽然 IGU 预报钟差精度约为 3 ns, 可以造成约 0.9 m 的测距误差, 但从实验结果可以看出, 其对定位和 ZTD 精度的影响并没有预计的那么大, 这主要是因为, 在获取卫星钟差的同时, 需要估计对流层延迟、接收机钟差和相位模糊度等参数, 由于参数之间的相关性, 接收机钟差和相位模糊度吸收了部分卫星钟差的影响。

4 结语

GPS 实时精密单点定位技术需要高精度的实时卫星轨道和钟差数据。虽然 IGU 预报产品的轨道可以满足实时 PPP 的需要, 但是目前的预报钟差却无法实时的精度要求。因此我们提出了一种近实时获取 GPS 卫星钟差的方法: 使用非差无电离层载波相位组合观测值, 基于 IGU 轨道产品和参考站网络数据近实时获取高精度的卫星钟差。实验使用全球 13 个均匀分布的 IGS 参考站观测数据, 获取的卫星钟差与 IGS 最终产品相比, 偏差基本都小于 0.3 ns, 平均优于 0.2 ns, 达到了 IGU 产品观测部分的钟差精度。进一步的分析表明, 基于本文实时估计所得的卫星钟差可以满足厘米级静态实时 PPP 定位要求, 同时也可获得毫米级精度的 PPP-ZTD 结果。此外, 部分卫星存在明显的日间 (day-boundary) 钟差跳跃现象, 这主要是因为每天参数 (比如模糊度) 重置所致, 这一问题有待更深层次的分析研究。

致谢 感谢 IGS 提供的参考站观测数据和 IGU 预报产品以及中南大学高性能网格计算平台提供的运算支持。

参 考 文 献

- 1 Gao Y, et al. Point real-time kinematic positioning [A]. Sanso F. A window on the future of geodesy [C]. Berlin: Springer, 2005, 77-82.
- 2 Bar-Sever Y, et al. Space applications of the NASA global

- differential GPS system [A]. Institute of navigation [C]. Portland, Oregon, USA, 2003.
- 3 Agrotis L, et al. Real time GNSS processing at ESOC; Infrastructure and initial results [A]. IGS Workshop 2008 [C]. Miami, Florida, USA, 2008.
 - 4 Hauschild A and Montenbruck O. Kalman - filter - based GPS clock estimation for near real - time positioning [J]. GPS Solutions, 2009, 13(3): 173 - 182.
 - 5 王潜心, 李黎, 龚佑兴. GPS 卫星钟的特性与预报研究 [J]. 测绘科学, 2010, 35(2): 36 - 39. (Wang Qianxin, Li Li and Gong Youxing. Study of GPS satellite clock's behaviors and prediction [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 25(2): 36 - 39)
 - 6 Zheng Z, Chen Y and Yi Z. A Study on the prediction of GPS satellite clock bias with IGS ultra-rapid products-preliminary results [A]. FIG working week [C]. Hong Kong, China, 2007.
 - 7 张小红, 等. 基于非差与历元差分两种模型估计精密卫星钟差的比较与分析 [EB/OL]. 2009 [2010]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/downPaper/200908-237>. (Zhang Xiaohong, et al. Comparison and analysis of estimations of precise satellite clock error based on non-difference model and the epoch differential model [EB/OL]. 2009 [2010]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/downPaper/200908-237>)
 - 8 施闯, 等. 广域实时精密定位原型系统及初步结果 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2009, 34(11): 1 271 - 1 274. (Shi Chuang, et al. A wide area real-time differential GPS prototype system and the initial results [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1 271 - 1 274)
 - 9 Ray J and Griffiths J. Status of IGS ultra-rapid products for real - time applications [A]. 2008 AGU fall meeting [C]. San Francisco, 2008.
 - 10 Takasu T and Kasai S. Precise orbit determination of GPS satellites using carrier phase measurements [A]. The 15th workshop on JAXA astrodynamics and flight mechanics [C]. Japan, 2005.
 - 11 Kouba J. A guide to using International GNSS Service (IGS) products [EB/OL]. 2009 [2010] <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
 - 12 Abdel-salam M A T. Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations [D]. Calgary, Alberta; University of Calgary, 2005.
 - 13 Bar-Sever Y E, Kroger P M and Borjesson J A. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B3): 5 019 - 5 035.
 - 14 Welch G and Bishop G. An introduction to the Kalman filter [EB/OL]. 2006 [2010]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.79.6578&rep=rep1&type=pdf>.
 - 15 Sedlak J. Comparison of Kalman filter and optimal smoother estimates of spacecraft attitude [EB/OL]. 1994 [2010]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940031131_1994031131.pdf.
 - 16 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现 [D]. 武汉大学, 2002. (Ye Shirong. Theory and its realization of GPS precise point positioning using un-differenced phase observation [D]. Wuhan University, 2002)

(上接第 110 页)

- 8 Niell, et al. Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor, radiometer, GPS and VLBI [J]. Journal of Atmospheric and Technology, 2000, 8: 830 - 850.
- 9 Flores A, Ruffini G and Rius A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays [J]. Annales Geophysicae, 2000, 18: 223 - 234.
- 10 Pany T, Pesec P and Stangl G. Atmospheric GPS slant path delays and ray tracing through numerical weather models, a comparison [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(3): 183 - 188.
- 11 Vedel H and Huang X. Impact of ground based GPS data on numerical weather prediction [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2004, 82(1B): 459 - 472.
- 12 Nillson T and Gradinarsky L. Water vapor tomography using GPS phase observations: simulation results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remotes Sensing, 2006, 44(10): 2 927 - 2 941.
- 13 Bender M and Raabe A. Preconditions to ground based GPS water vapour tomography [J]. Annales Geophysicae, 2007, 25(8): 1 727 - 1 734.
- 14 Galina D, Gerd G and Christoph R. First experience with near real-time water vapor estimation in a German GPS network [J]. Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics, 2001, 63: 1 295 - 1 304.
- 15 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析 [J]. 测绘学报, 1998, 27(2): 113 - 118. (Chen Junyong. On the error analysis for the remote sensing of atmospheric water vapor by ground based GPS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(2): 113 - 118)
- 16 曲建光. GPS 遥感气象要素的理论与应用研究 [D]. 武汉大学, 2005. (Qu Jianguang. Theory and application of GPS meteorological remote sensing [D]. Wuhan University, 2005)
- 17 章红平. 利用地基 GPS 数据估计大气可降水量 [D]. 武汉大学, 2003. (Zhang Hongping. Estimation of PWV using ground-based GPS data [D]. Wuhan University, 2003)
- 18 王勇, 等. 利用 GPS 技术反演中国大陆水汽变化 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2007, 32(2): 152 - 155. (Wang Yong, et al. Retrieving change of precipitable water vapor in Chinese mainland by GPS technique [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(2): 152 - 155)
- 19 曹云昌, 陈永奇, 李炳华. GPS 测定大气绝对湿度廓线方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1 132 - 1 135. (Cao Yunchang, Chen Yongqi and Li Binghua. Determining atmospheric absolute humidity by GPS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1 132 - 1 135)
- 20 毕研盟, 等. 海南 GPS 网探测对流层水汽廓线的试验研究 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 412 - 419. (Bi Yanmeng, et al. Tropospheric water vapor profiles using GPS network in Hainan [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(4): 412 - 419.)
- 21 Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radiowave lengths [J]. J. Geophys. Res., 1996, 101: 3 227 - 3 246.
- 22 Davis J L, et al. Ground-based measurement of gradients in the "wet" radio refractivity of air [J]. Radio Sci., 2003, 28: 1 003 - 1 018.
- 23 精密动态/静态单点定位软件 TriP 用户手册 [S]. 武汉大学, 2009. (User's Manual Precise of Dynamic. Static point positioning software trip [S]. Wuhan University, 2009.)