

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. 地球物理学报, 2010, 53(6):1302~1307, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.008

Li H J, Wang J X, Chen J P, et al. The realization and analysis of GNSS network based real-time precise point positioning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6):1302~1307, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.008

基于 GNSS 网络的实时精密单点定位及精度分析

李浩军¹, 王解先^{1,2}, 陈俊平³, 胡丛玮^{1,2}, 王 虎¹

1 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092

2 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092

3 德国地球科学研究中心, 波茨坦 14473

摘 要 基于局域 GNSS 网络, 以历元间、星间差分技术实时估计了 GPS 卫星相对钟差的历元间差值; 针对所估计实时精密钟差的特征, 推导了实时精密单点定位的估计模型. 对所估计得到的相对钟差的历元间差值、实时定位结果分别进行了比较、分析. 结果表明, 相对钟差的历元间差值与 IGS 的最终星历相比其精度可以达到 0.08 ns; 每小时观测的实时静态定位结果在 N、E、U 三个方向的精度分别为 1.47、3.62、4.09 cm. 动态模式, 实时结果在 N、E、U 三个方向的精度分别为 2.63、3.82、5.20 cm. 与采用 IGS 最终轨道和钟差解算的结果相比较, 实时计算结果优于采用精密轨道和精密钟差计算结果.

关键词 实时精密单点定位, GNSS 网络, 历元间差分, 星间差分

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.008

中图分类号 P223

收稿日期 2009-10-29, 2010-05-07 收修定稿

The realization and analysis of GNSS network based real-time precise point positioning

LI Hao-Jun¹, WANG Jie-Xian^{1,2}, CHEN Jun-Ping³, HU Cong-Wei^{1,2}, WANG Hu¹

1 Department of Surveying and Geo-informatics Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092, China

3 Deutsches GeoForschungsZentrum-GFZ, 14473, Potsdam, Germany

Abstract Based on the regional GNSS (Global Navigation Satellite System) network, the real-time epoch-differenced values of relative clock are estimated using the algorithm of epoch-differential and satellite-differential derived model. On account of the character of precise real-time clocks, the estimation model of real-time precise point positioning is deduced by a satellite-differential algorithm. Comparing the epoch-differenced values of relative clock and the IGS final products, the accuracy can be at 0.08 ns. The hourly data was processed using the real-time precise point positioning algorithm based on the estimated real-time precise clocks. In static mode, the hourly positioning accuracy in the N, E and U directions are 1.47, 3.62, 4.09 cm respectively. The kinematic positioning accuracy in the N, E and U directions are 2.63, 3.82, 5.20 cm respectively. The accuracy of real-time solution is better than the precise point positioning using the IGS final orbits and clocks in the N, E and U three directions.

Keywords Real-time precise point positioning, GNSS network, Epoch-differenced, Satellite-differenced

1 引言

自从 1997 年精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 被 Zumberge 等^[1]提出以来,国内外学者^[2~7]进行了一系列研究,其后处理精度可以达到厘米级^[2~7]. 由于精密轨道、钟差产品一般需要 13 天之后才能得到,因此,实时精密单点定位的实现成了目前精密单点定位研究的主要内容之一. 研究^[8]得到,超快速 (Ultra-PRD, IGU) 轨道径向精度与 IGS 最终轨道精度相当,IGU 轨道每 6h 进行更新,实时 GPS 轨道可以通过 IGS 超快速轨道获得,实时钟差估计成了实时 PPP 研究的重要内容. 目前 IGS 组织的 JPL、欧洲的 BKG、GFZ、ESA 等知名研究机构正在开展实时全球或区域网络监测以及实时精密单点定位服务的相关研究^[9,10]. 精密钟差通常通过全球或局域 GNSS 网络进行估计,但估计参数个数会随着测站数目的增加而增加,严重影响了其实时估计. 历元间、星间差分^[11]可以消除模糊度、接收机钟差参数,大大减少估计参数的个数. 本文采用无电离层组合,基于 GNSS 参考站网络观测进行卫星钟差的实时估计,采用实时估计得到的钟差进行 PPP 数据解算,在 PPP 参数估计时,对流层延迟予以实时估计. 对流层延迟参数的实时估计,对于大气研究、实时天气预报^[12]具有重要的意义.

2 基于 GNSS 网络的实时钟差估计

2.1 相对钟差历元间差的估计

非差无电离层相位观测组合为

$$L^j = \rho^j + c \cdot \delta - c \cdot \delta^j + n^j + T^j + \epsilon(\Phi_{IF})^j, \quad (1)$$

式中 L^j 为接收机对 GPS 卫星 j 的无电离层相位观测值, ρ^j 为站星距离, c 为光速, δ 、 δ^j 分别为接收机、GPS 卫星钟差, n^j 为组合模糊度, T^j 为对流层延迟, $\epsilon(\Phi_{IF})^j$ 为其他误差项,包括潮汐改正、相位缠绕等以及未被模型化的误差. 同一历元,进行星间差分,消去接收机钟差,并整理得到:

$$\delta^{j,i} = \frac{1}{c}(\rho^{j,i} + n^{j,i} + T^{j,i} + \epsilon(\Phi_{IF}) - L^{j,i}), \quad (2)$$

式中 j, i 为星间差分算子,表示各相应参数星间差值,如 $L^{j,i}$ 为卫星 i 与卫星 j 相位观测值之差; $\delta^{j,i}$ 为卫星 i 与卫星 j 钟差之差,定义为相对钟差. 在没有周跳情况下,进行单站星间、历元间差分,相邻历元 n 和 $n-1$ 相减消去模糊度,整理得到:

$$\Delta \delta_n^{j,i} = \frac{1}{c}(\Delta \rho_n^{j,i} + \Delta T^{j,i} + \Delta \epsilon(\Phi_{IF})^{j,i} - \Delta L_n^{j,i}), \quad (3)$$

式中 Δ 为历元间差分算子,表示各相应参数的历元间差值,如 $\Delta L_n^{j,i}$ 为星间差分观测值的历元间差值; $\Delta \delta_n^{j,i}$ 为相对钟差的历元间差.

2.2 基于 GNSS 网络的相对钟差历元间差的估计

基于 GNSS 参考站网络观测时,由于参考站坐标已知,对流层延迟可以通过 Saastamoinen 改正模型^[13]计算,这样可以通过式(3)进行实时相对钟差历元间差 $\Delta \delta_n^{j,i}$ 的估计. 设 GNSS 网络有 k 个参考站,分别采用每个参考站的观测数据,实时估计相对钟差的历元间差. 设由每个参考站估计得到的第 n 和 $n-1$ 历元相对钟差之差为 $\Delta \delta_{n,m}^{j,i}$ ($m=1, 2, \dots, k$), 则最终估计值为

$$\Delta \delta_n^{j,i} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{m=1}^k \Delta \delta_{n,m}^{j,i}. \quad (4)$$

通过 GNSS 网络,估计得到相对钟差的历元间差之后,选择一参考历元,设参考历元的相对钟差为 $\delta_{ref}^{j,i}$, 则任意历元的相对钟差为

$$\delta_n^{j,i} = \delta_{ref}^{j,i} + \sum_{e=1}^f \Delta \delta_e^{j,i}, \quad (5)$$

式中 $\delta_n^{j,i}$ 为第 n 历元的相对钟差; $\Delta \delta_e^{j,i}$ 为第 e 和 $e-1$ 历元间相对钟差的差值; f 为参考历元相对于历元 n 的历元个数.

2.3 相对钟差近似解的估计

伪距无电离层观测组合为

$$P^j = \rho^j + c\delta - c\delta^j + T^j + \epsilon(P_{IF})^j, \quad (6)$$

式中 P^j 为 GPS 卫星 j 的无电离层伪距观测值; $\epsilon(P_{IF})^j$ 为其他误差项,包括潮汐改正、相位缠绕等以及未被模型化的误差. 同一历元,进行星间差分,消去接收机钟差,并整理得到:

$$\delta^{j,i} = \frac{1}{c}(\rho^{j,i} - P^{j,i} + T^{j,i} + \epsilon(P_{IF})^{j,i}), \quad (7)$$

式中 j, i 为星间差分算子,表示各相应参数星间差值. 由于 GNSS 网络参考站坐标已知,对流层延迟可以采用模型进行改正,故通过式(7)可进行相对钟差近似解的估计.

3 单站星间差分精密单点定位模型

实时精密钟差为基于参考星的相对钟差,根据这一特点,PPP 模型推导如下. 线性化星间差分公式,设位置参数为 $\mathbf{X}^T = |\Delta X, \Delta Y, \Delta Z|$, 可以写为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{j,i} \cdot \mathbf{X} + \rho_0^{j,i} + n^{j,i} - c \cdot \delta^{j,i} + T^{j,i} \\ = L^{j,i} - \epsilon(\Phi_{IF})^{j,i}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $A^{j,i}$ 为卫星 i 与卫星 j 对应的设计矩阵之差; $\rho_0^{j,i}$ 为站星距离星间差的近似值; 对流层参数的估计一般可以表示成一个映射函数和天顶方向延迟的乘积, 设 $T^{j,i} = m(z)^{j,i} ZTD$, 式中 $m(z)^{j,i}$ 为卫星 i 与卫星 j 对流层映射函数值之差; ZTD 为该时刻天顶方向延迟; 并设 $L' = L^{j,i} - \epsilon(\Phi_{IF})^{j,i}$, 把式(5)代入式(8), 得到

$$A^{j,i} \cdot X + \rho_0^{j,i} + n^{j,i} - c \cdot \left(\delta_{ref}^{j,i} + \sum_{e=1}^f \Delta \delta_e^{j,i} \right) + m(z)^{j,i} ZTD = L' \quad (9)$$

参考历元的相对钟差 $\delta_{ref}^{j,i}$ 在解算过程中会被模糊度参数吸收, 设其为 $N^{j,i} = n^{j,i} - c \cdot \delta_{ref}^{j,i}$, 并定义为伪模糊度; $\sum_{e=1}^f \Delta \delta_e^{j,i}$ 通过 GNSS 参考站网络实时估计得到, 设 $L = L' + c \cdot \sum_{e=1}^f \Delta \delta_e^{j,i} - \rho_0^{j,i}$, 式(9)可以写为

$$A^{j,i} \cdot X + N^{j,i} + m(z)^{j,i} ZTD = L \quad (10)$$

通过观测方程式(10), 就可以进行各参数的实时估计. 待估参数为接收机坐标、天顶延迟、伪模糊度.

4 坐标参数初值的求解

通过线性化伪距无电离层组合星间差分公式, 得到

$$A^{j,i} \cdot X = P^{j,i} - \rho_0^{j,i} + c \cdot \delta^{j,i} - T^{j,i} - \epsilon(P_{IF})^{j,i} \quad (11)$$

$\Delta \delta^{j,i}$ 的近似值 $\Delta \delta_0^{j,i}$ 通过 GNSS 观测网络实时估计得到, 对流层延迟可以通过 Saastamoinen 改正模型^[13] 计算. 设 $l^{j,i} = P^{j,i} - \rho_0^{j,i} + c \cdot \delta^{j,i} - T^{j,i} - \epsilon(P_{IF})^{j,i}$, 则式(11)写为

$$A^{j,i} \cdot X = l^{j,i} \quad (12)$$

由(12)式知, 估计参数只有坐标参数. 当观测卫星个数大于 4 颗时, 就可以进行坐标参数的计算.

5 实时精密单点定位的实现与精度分析

实时 PPP 的实现, 必须以基于全球或局部 GNSS 网络的实时钟差估计和 IGU 轨道的下载为前提. 目前许多国家和地区建立了全球或局域性的实时参考站网络, 如基于 IGS-RTPP^[10] (IGS Real Time Pilot Project), IGS 在全球建立了近 100 个实时站, 这些站大部分都是 IGS 的参考站; 还有德国的 SAPOS 网络^[14,15], 日本的 GRAPES 网络^[16] 等, 我国近年也启动了陆态网络工程, 将在全国范围内建立约 260 个左右实时连续参考站, 这为基于

GNSS 网络进行实时钟差的估计提供了硬件条件. 基于以上理论我们进行了实时 PPP 软件 Net-PPP 的编写. 对应流程见图 1.

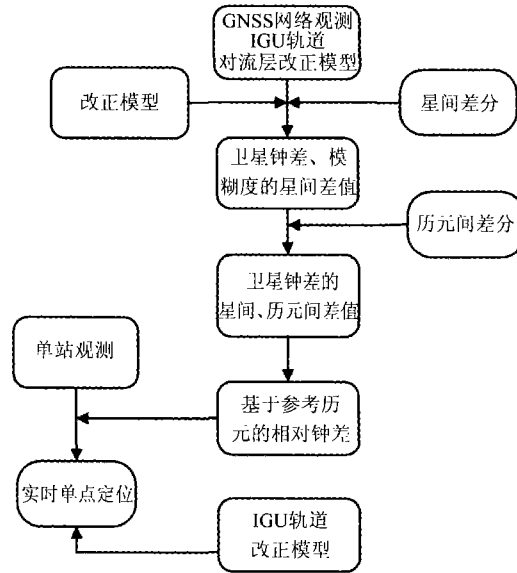


图 1 实时 PPP 流程图

Fig. 1 Flow chart of real-time PPP

本文采用上海 GNSS 网络 9 个参考站 2009 年 3 月 1 号 24 h、采样间隔为 30 s 的实时观测数据, 进行了钟差的实时估计、发送, 采用同济大学 GPS 基准站 24 h、采样间隔为 30 s 的实时观测数据进行了实时 PPP 解算.

5.1 相对钟差估计结果分析

根据本文钟差估计理论、方法, 基于 GNSS 网络可以进行相对钟差历元间差值的估计. 选择 17 号卫星为参考星, 来估计其他卫星相对于 17 号卫星的相对钟差. 估计得到的相对钟差的历元间差值与 IGS 的最终精密钟差相比较, 其 RMS 值如图 2 所示.

由图 2 可知, 基于 GNSS 网络估计得到的实时相对钟差的历元间差值与 IGS 的最终钟差相比较, 其精度可以达到 0.08 ns. 在估计得到相对钟差历元间差值以及相对钟差近似解之后, 进行坐标初值、定位的解算.

5.2 坐标初值求解及精度分析

初值是以伪距观测组合为基础, 并结合实时接收到的钟差的近似解来估计坐标参数的值. 由于伪距观测值精度较低, 所以以其观测组合求解的坐标参数的精度相对较低, 但其可作为相位观测解算的初值. 实时 PPP 解算过程中伪距观测组合模型的估计结果划归为以同济大学基准站为中心的站心坐标系 (NEU), 其结果见图 3. 从图 3 可以看到, 伪距估

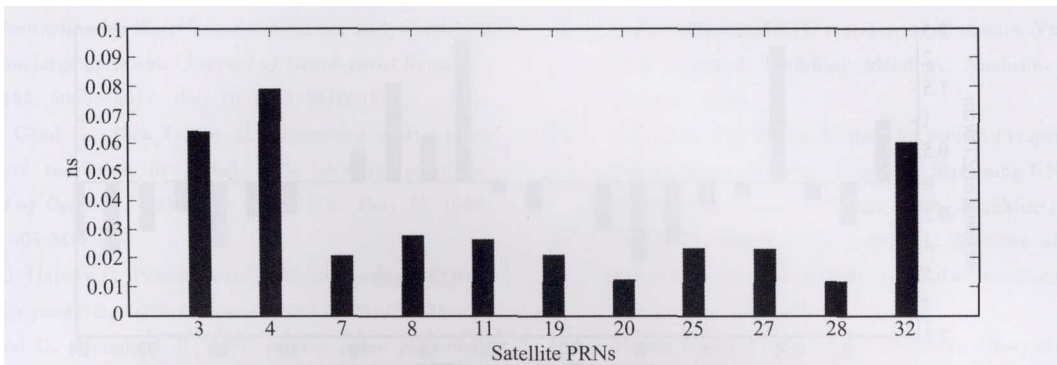


图 2 相对钟差历元间值与 IGS 最终星历相比较的 RMS 值

Fig. 2 RMS of the epoch-differenced values of relative clocks compared with the IGS final products

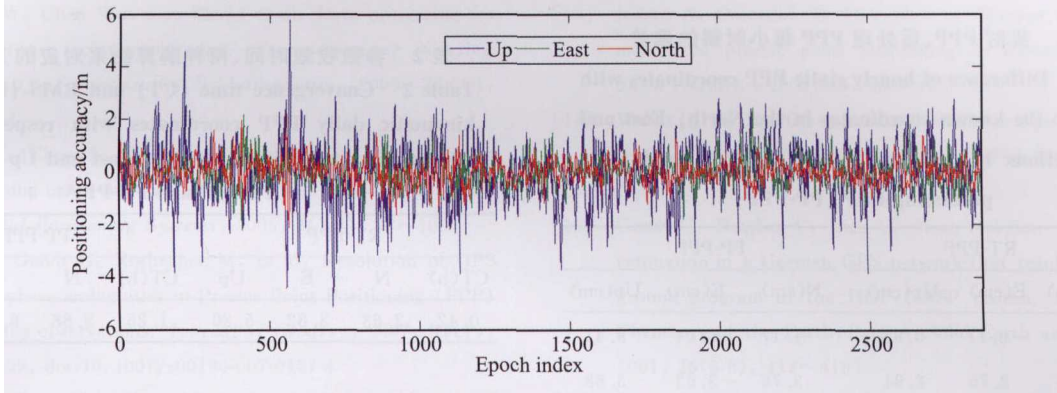


图 3 伪距估计结果

Fig. 3 The results of code observations

计值结果在 N、E 两个方向优于 2 m, U 方向绝大部分优于 2 m, 这完全满足相位解算的初值。

5.3 实时 PPP 结果及其分析

实时 PPP 解算时,以伪距组合的估计值作为解算初值,然后基于卡尔曼滤波,以相位观测组合进行参数估计,截止卫星高度角 10° 。为了研究实时 PPP 静态定位精度以及稳定性,静态解算时,把 24 h 观测值均分为 24 个观测值,即就是 24 个时段,来估计每小时的定位解。同时,在得到 IGS 最终钟差之后也进行了 PPP 的后处理,各时段定位结果划归为以同济大学基准站为中心的站心坐标系(NEU)如表 1。

从表 1 可以看出, N 方向每小时的实时估计结果绝大部分测段的精度优于 2 cm, 占总测段的 92%, 100% 测段的定位精度可以得到厘米级; E 方向绝大部分测段精度优于 3 cm, 占总测段的 71%, 96% 的测段可以达到厘米级; U 方向绝大部分测段的精度优于 4 cm, 占总测段的 79%, 92% 的测段可以达到厘米级。24 个测段解算结果对应的 RMS 在 N、E、U 三个方向分别为: 1.47, 3.62, 4.09 cm。以最

终轨道与钟差来计算的结果中, N 方向优于 2 cm 的测段只占 12.5%, E 方向优于 3 cm 的测段只占 8.33%, U 方向优于 4 cm 的测段只占 12.5%。24 个测段解算结果对应的 RMS 在 N、E、U 三个方向分别为: 6.90, 8.23, 9.88 cm。比较这两种结果可以得到,以本文所采用的钟差估计结果进行实时 PPP 解算,其结果优于以最终轨道和钟差的计算结果。实时 PPP 在定位解算的同时,进行了对流层天顶延迟的估计,所估计的对流层天顶延迟与 GAMIT 软件所估计的结果相比较,如图 4 所示。从图 4 可得,实时 PPP 估计结果与 GAMIT 软件的结果相比较,对流层天顶延迟对应的最大偏差为 2.2 cm, 相应的 RMS 值为 0.987 cm。在实时精密单点定位解算过程中,对 24 h 的观测值也进行了动态模式解算,动态模式解算时也分别以估计得到的钟差和 IGS 最终精密轨道和钟差两种方法进行了解算,对应结果见表 2。从表 2 可得,实时 PPP 的动态解算结果优于以 IGS 事后精密轨道和钟差进行解算得到的结果,且参数收敛时间速度较快。

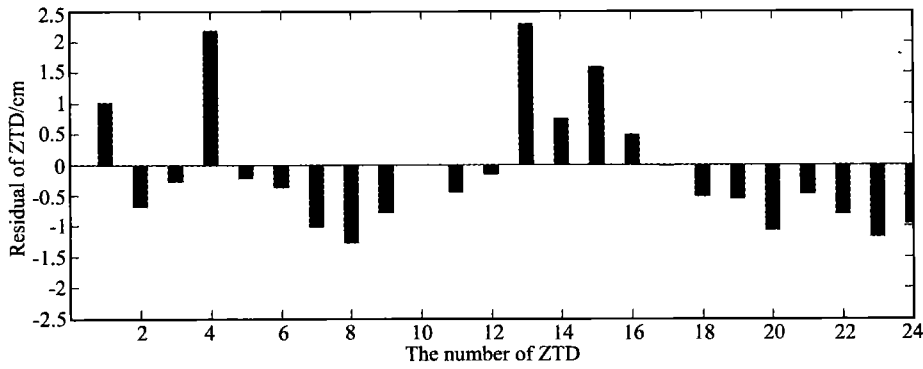


图 4 ZTD 估计结果与 GAMIT 软件估计结果偏差

Fig. 4 The difference of ZTD between the RT-PPP and GAMIT

表 1 实时 PPP、后处理 PPP 每小时解的偏差

Table 1 Difference of hourly static PPP coordinates with respect to the known coordinates in the North, East and Up directions in real-time PPP (RT-PPP) and post-processing PPP (PP-PPP)

观测时段	RT-PPP			PP-PPP		
	N(cm)	E(cm)	Up(cm)	N(cm)	E(cm)	Up(cm)
1	1.49	-2.17	0.95	-1.17	5.04	9.41
2	1.25	2.75	2.94	3.76	-3.63	3.68
3	1.09	-1.34	-0.31	8.77	7.13	9.63
4	-1.67	-1.79	10.29	1.14	3.83	-11.76
5	-0.65	-3.71	-3.88	-7.35	8.81	9.71
6	0.66	-5.89	1.29	8.50	-9.59	-10.84
7	0.51	2.56	-7.51	9.45	10.28	-11.77
8	1.80	-11.38	-2.40	7.60	-8.84	-9.71
9	-1.70	0.76	0.59	-2.03	2.75	-1.68
10	-0.24	4.45	-1.00	-1.37	1.42	2.22
11	-0.78	0.05	-4.17	3.20	-5.24	-5.96
12	-0.32	0.67	-1.43	9.07	-10.54	12.35
13	1.41	-0.13	0.78	2.01	9.78	-11.21
14	1.68	3.90	0.48	-2.70	-8.72	9.25
15	-0.76	1.97	3.66	8.79	-9.00	10.15
16	1.72	2.47	-0.73	6.92	9.63	-11.32
17	-0.34	1.37	-3.22	6.62	-4.78	10.64
18	2.40	-4.34	-10.57	4.86	-3.80	-6.04
19	0.20	2.15	0.14	4.06	9.93	11.84
20	-4.55	-2.59	-3.90	9.31	-10.61	-11.43
21	0.39	-0.89	0.56	8.73	-8.93	-9.38
22	0.91	-5.72	-4.64	-9.29	10.11	11.16
23	-0.02	0.81	3.50	-9.97	10.98	11.48
24	0.43	1.03	-0.07	10.44	-11.1	-12.75
RMS	1.47	3.62	4.09	6.90	8.23	9.88

表 2 参数收敛时间、两种解算结果对应的 RMS 值

Table 2 Convergence time (CT) and RMS (in cm) of kinematic daily PPP coordinates with respect to the known coordinates in the North, East and Up directions in RT-PPP and PP-PPP

CT(h)	RT-PPP			PP-PPP			
	N	E	Up	CT(h)	N	E	Up
0.42	2.63	3.82	5.20	1.25	3.88	6.69	14.15

6 结 论

本文系统地推导了基于 GNSS 网络的实时钟差、实时 PPP 以及初值的估计模型,讨论了模糊度和相对钟差参考历元的和以伪模糊度进行处理的方式,并基于上海 GNSS 网络 9 个参考站的观测数据进行了实时钟差估计,采用同济大学 GPS 基准站的观测数据进行了实时 PPP 解算.从 24 个观测时间为 1 h 的观测时段的定位结果可得,每小时实时 PPP 的静态定位精度,在 N、E、U 三个方向可以达到 1.47、3.62、4.09 cm.动态定位时,其精度在 N、E、U 三个方向可以达到 2.63、3.82、5.20 cm.与采用最终精密轨道、钟差的解算结果相比较,实时 PPP 的定位精度优于其定位精度.基于 GNSS 网络的实时 PPP 的实现,对于完善、扩大 GNSS 网络系统的应用范围,进行天气实时预报、气象研究、GNSS 移动基准站的实现,以及我国卫星导航服务中心的建设、地壳实时监测都具有重要的意义.但是基于 GNSS 网络的实时 PPP 仍然和采用 IGS 最终轨道、钟差解算时一样,对应模糊度不为整数,因此对于其模糊度的快速固定需要进一步研究.

参考文献 (References)

[1] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise

- Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 5005~5017. doi: 10.1029/96JB03860
- [2] Ge G, Gend G, Dick G, et al. Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions. *Journal of Geodesy*, 2005, **79**: 103~110. Doi: 10.1007/s00190-005-0447-0
- [3] Kouba J, Heroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 2001, **5**(2): 12~28
- [4] Satirapod C, Homniam P. GPS precise point positioning software for ground control point establishment in remote sensing. *Journal of Surveying Engineering*, 2006, **132**(1): 11~14
- [5] Hu C W, Chen Wu, Gao Shan, et al. Data processing for GPS precise point positioning. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, **22**(2): 124~13
- [6] Gao Y, Chen K. Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products. *Journal of Global Positioning Systems*, 2005, **3**(1-2): 95~100
- [7] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 2007, **82**(7): 389~399, doi:10.1007/s00190-007-0187-4
- [8] André Hauschild, Oliver Montenbruck. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning. *GPS Solutions*, 2009, **13**: 173~182, doi: 10.1007/s10291-008-0110-3
- [9] Muellerschoen R, Bertiger M, et al. An internet-based global differential GPS system, initial results. Proceedings of ION National Technical Meeting, Anaheim, California, January, 2000
- [10] Caissy M. The IGS real-time pilot project-Perspective on data and product generation. Report at Streaming GNSS Data via Internet Symposium, 6-7 Feb, 2006, Frankfurt, 2006
- [11] Han S C, Kwon H J, Jekeli C. Accurate absolute GPS positioning through satellite clock error estimation. *Journal of Geodesy*, 2001, **75**: 33~43
- [12] Huang Ching Yuang, Kuo Yinghwa, Chen Shuya, et al. Impact of GPS radio occultation data assimilation on regional weather predictions. *GPS Solutions*, 2010, **14**: 35~49, doi: 10.1007/s10291-009-0144-1
- [13] Jensen A, Ovstedal O. The effect of different tropospheric models on precise point positioning in kinematic model. *Survey Review*, 2008, **40**, 308: 173~187
- [14] Weber G. The SAPOS system in Germany oral presentation at the 3rd Asia Pacific Rim Meeting, 6-9 Feb 2001, Tokyo, Japan
- [15] Gendt G, Reigber C, Dick G. Near real-time water vapor estimation in a German GPS network-first results from the ground program of the HGF GASP project. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, **26**(6-8): 413~416
- [16] Miyazaki S H, Tsuji Y, Hatanka Y. Establishment of the nationwide GPS array (GRAPES) and its initial results on the crustal deformation of Japan. *Bull. Geog. Surv. Inst. Jpn*, 1996, **42**: 27~41

(本文编辑 胡素芳)