

# 基于局域参考站网络伪距观测的钟差估计及应用

李浩军<sup>1,2</sup>, 王解先<sup>1,3</sup>, 刘三枝<sup>4</sup>

(1. 同济大学 测量系, 上海 200092; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 3. 同济大学 现代工程测量国家测绘局  
重点实验室, 上海, 200092; 4. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 系统地推导了基于局域参考站网络伪距观测进行实时钟差的运算公式, 并讨论了以估计得到的钟差进行实时单站定位的数学模型. 采用所推导的公式及数学模型, 以上海参考站网络和同济大学 GPS 基准站的伪距观测数据, 进行了 GPS 卫星钟差的实时估计和实时动态单点定位解算. 结果表明, 单历元伪距观测动态定位结果在北、东、上三个方向的均方根(RMS)值可达到 0.444 2, 0.522 7, 1.110 9 m.

**关键词:** 伪距观测; 实时钟差; 实时单点定位

**中图分类号:** P 228.4

**文献标识码:** A

## Estimation and Application of Clock Error Based on Pseudorange Observation of Regional Reference Network

LI Haojun<sup>1,2</sup>, WANG Jie-xian<sup>1,3</sup>, LIU Sanzhi<sup>4</sup>

(1. Department of Surveying and Geo-informatics Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Modern Engineering Surveying of the State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092, China; 4. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 200092, China)

**Abstract:** The formula by which the real-time clocks are estimated is deduced, and the model of precise point positioning is discussed based on the pseudorange observation of regional reference network. The pseudorange observation from Shanghai reference network is used to estimate clocks using the presented method. Using the estimated clocks, the data from Tongji University Station is processed in real-time point positioning mode. The real-time kinematic results indicate that the root mean square (RMS) of three directions such as the North, the East and the Up are 0.444 2, 0.522 7, 1.110 9 m, respectively.

**Key words:** pseudorange observation; real-time clock error; real-time point positioning

目前, IGS(international global service)在全球建立了近 100 个实时观测站, 大部分都是 IGS 参考站. 除此之外, 很多国家和地区建立了局域性的观测站网络, 例如德国的 SAPOS 网络<sup>[1-2]</sup>、日本的 GRAPES 网络<sup>[1-2]</sup>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 250 个实时连续参考站. 随着全球以及局部 GNSS(global navigation satellite system)参考站网络数量的增多, 近年来, 基于网络服务及相关算法的研究受到了国内外学者的重视. 基于 GNSS 参考站网络观测分析、估计与卫星相关的误差、观测量特性的研究较多. 有学者基于全球 IGS 参考站网络, 研究了精密单点定位中影响模糊度参数不为整数的 UPD(uncalibrated phase delays, 未检校的相位延迟), 进而以整数的特性来固定非差模糊度<sup>[3-4]</sup>; 也有的基于全球 GNSS 网络相位、伪距观测进行卫星钟差的估计, 解算需要一定时间来初始化<sup>[5-6]</sup>. 伪距和相位观测都是 GPS 接收机观测量之一, 二者最大的区别就是相位观测中存在整周模糊度, 因而增加了以相位观测定位及其他解算时估计参数的个数, 并且整周模糊度参数的收敛需要一定的时间, 会影响实时钟差的发送及相应用户的使用. 笔者以局域参考站网络的伪距观测估计 GPS 卫星的实时钟差, 可以避免钟差求解、单站定位时参数的收敛问题, 达到快速服务、定位的目的, 同时研究相应服务的可靠性, 分析对应结果的精度.

收稿日期: 2010-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(40974018); 中国大陆构造环境监测网络工程(CMONOC II -RJ-2008-005)

第一作者: 李浩军(1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为卫星大地测量及精密单点定位. E-mail: yanlhjch@126.com

通讯作者: 王解先(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为卫星大地测量与应用. E-mail: wangjexian@tongji.edu.cn

## 1 基于伪距观测的卫星钟差估计

伪距无电离层观测组合为

$$P_j = \rho_j + c\delta - c\delta_j + t_j + \varepsilon(P_F)_j \quad (1)$$

式中:  $P_j$  为接收机对 GPS 卫星  $j$  的无电离层伪距观测值;  $c$  为光速;  $\rho_j$  为站星之间距离;  $\delta$  为接收机钟差;  $\delta_j$  为卫星钟差;  $t_j$  为对流层延迟;  $\varepsilon(P_F)_j$  为其他误差项, 包括潮汐改正、地球自转等以及未被模型化的误差. 对同一历元进行星间差分, 消去接收机钟差, 整理得到

$$P_{j,i} = \rho_{j,i} - c\delta_{j,i} + t_{j,i} + \varepsilon(P_F)_{j,i} \quad (2)$$

进一步整理得到

$$c\delta_{j,i} = \rho_{j,i} - P_{j,i} + t_{j,i} + \varepsilon(P_F)_{j,i} \quad (3)$$

式中:  $P_{j,i}$  为卫星  $i$  与卫星  $j$  伪距观测值之差;  $\rho_{j,i}$  为站星之间距离的星间差;  $t_{j,i}$  为对流层延迟的星间差;  $\varepsilon(P_F)_{j,i}$  为卫星  $i$  与卫星  $j$  其他误差项之差, 包括潮汐改正、地球自转等以及未被模型化的误差之差. 对流层延迟可以采用模型来改正, GPS 卫星轨道可以采用 IGS 中心提供的超快速预报星历 IGU (Ultra-PRD)<sup>[7-8]</sup>, 因此, 只要观测站的坐标已知, 就可以估计得到 GPS 卫星钟差的星间差, 即相对钟差. 由于局域参考站的坐标已知, 基于参考站网络观测, 可以实时估计 GPS 卫星钟差.

## 2 基于伪距观测和实时钟差的单站定位模型

对伪距无电离层组合星间差分公式(2)线性化, 得到

$$A_{j,i}\mathbf{X} = P_{j,i} - \rho_{j,i,0} + c\delta_{j,i} - t_{j,i} - \varepsilon(P_F)_{j,i} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{X} = [X \ Y \ Z]^T$ ;  $\rho_{j,i,0}$  为站星之间的近似距离. 卫星钟差的星间差  $\delta_{j,i}$  可以通过参考站网络伪距观测, 并以式(3)估计得到; 对流层延迟可以采用 Saastamoinen 改正模型<sup>[9-10]</sup>计算.

设  $L = P_{j,i} - \rho_{j,i,0} + c\delta_{j,i} - t_{j,i} - \varepsilon(P_F)_{j,i}$ , 式(4)可以整理为

$$A_{j,i}\mathbf{X} = L \quad (5)$$

由式(5)可以得到, 只要卫星数大于等于 4 颗时, 就可以采用最小二乘或卡尔曼滤波估计位置参数.

## 3 实时单点定位及精度分析

实时单站定位, 必须以基于参考站网络观测的实时精密钟差估计和超快速轨道(IGU)的下载为前提. 其流程见图 1.

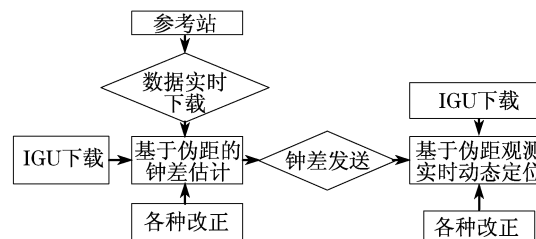


图 1 实时单站动态定位流程图

Fig.1 Flow chart of real-time kinematic point positioning

通过实时下载或接收每个基准站的伪距观测数据, 并利用下载的 IGU、各种改正模型(固体潮、地球自转、对流层延迟等模型), 即可按照式(3)估计卫星钟差. 假设参考站网络中基准站数为  $k$ , 每个基准站估计得到的卫星钟差为  $\delta_{j,i,n}$  ( $n = 1, \dots, k$ ), 一般情况下, 最终的钟差估计值可以写为

$$\delta_{j,i} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \delta_{j,i,n} \quad (6)$$

由于伪距观测噪声以及难以模型化误差的存在(其对每个基准站钟差估计值的影响不同), 在以每个基准站的观测值估计得到卫星钟差  $\delta_{j,i,n}$  ( $n = 1, \dots, k$ ) 之后, 采用选权的方法计算最终的卫星钟差. 采用的权函数<sup>[11]</sup>为

$$\bar{p}_n = \begin{cases} 1, & |v_n| \leq k_0 \\ \frac{k_0}{|v_n|} \left( \frac{k_1 - |v_n|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |v_n| \leq k_1 \\ 0, & |v_n| > k_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\bar{p}_n$  为等价权矩阵;  $v_n = \mathbf{V}_n / \sigma_0$ ,  $\mathbf{V}_n$  为残差向量;  $k_0, k_1$  为常数, 一般情况下,  $k_0 = 1.0 \sim 2.5$ ,  $k_1 = 3.0 \sim 8.0$ . 本文采用的初始权取为 1, 在得到新的权  $\bar{p}_m$  后, 钟差可以表示为

$$\delta_{j,i} = \sum_{n=1}^k (\delta_{j,i,n} \bar{p}_n) / \sum_{n=1}^k \bar{p}_n \quad (8)$$

在估计得到卫星钟差之后, 发送到接收机, 接收机结合 IGU、伪距观测, 以实时钟差进行实时动态定位. 2009 年 1 月 11 号, 以上海 9 个基准站的采样、间隔为 30 s 的实时观测数据, 实时估计钟差. 选择 11 号卫星为基准星时, 估计跟踪到卫星的钟差. 限于篇

幅,列举个别卫星对应的结果.其中 8 号和 28 号卫星的结果如图 2a,b 所示.

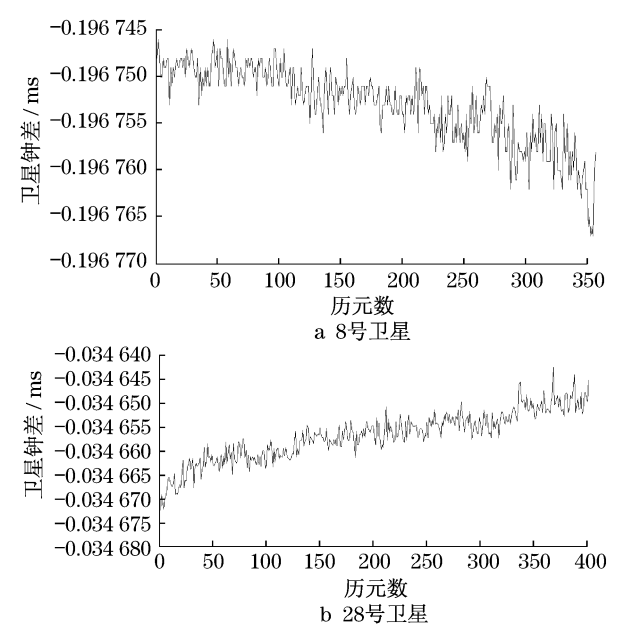


图 2 8 号和 28 号卫星钟差结果

Fig.2 Clock error of number 8 and 28 satellite

基于估计得到的实时钟差,以同济大学基准站 24 h 采样间隔为 30 s 的实时观测数据,采用最小二乘估计方法解算实时位置.以同济大学基准站为站心坐标系,北、东、上三个方向的 RMS (root mean

square,均方根)值分别为 0.445,0.529,1.124 m,对应结果见图 3.

从图 3 得到:基于局域参考站网络伪距观测估计实时钟差,并采用估计得到的钟差结合伪距观测单点定位时,单历元动态定位在北、东方向精度优于 2 m,上向的绝大部分精度优于 2 m.对 2009 年 1 月 12 号到 21 号 10 d 的观测数据进行解算,其 RMS 定位结果见表 1.

表 1 各日期的定位结果  
Tab.1 Positioning solutions of different days m

日期	方向		
	北	东	上
2009-01-12	0.445 0	0.529 0	1.124 0
2009-01-13	0.501 0	0.519 0	1.114 0
2009-01-14	0.452 0	0.540 0	1.104 0
2009-01-15	0.441 0	0.509 0	1.122 0
2009-01-16	0.421 0	0.511 0	1.044 0
2009-01-17	0.437 0	0.501 0	1.197 0
2009-01-18	0.417 0	0.532 0	1.082 0
2009-01-19	0.431 0	0.556 0	1.119 0
2009-01-20	0.426 0	0.513 0	1.097 0
2009-01-21	0.471 0	0.517 0	1.106 0
平均值	0.444 2	0.522 7	1.110 9

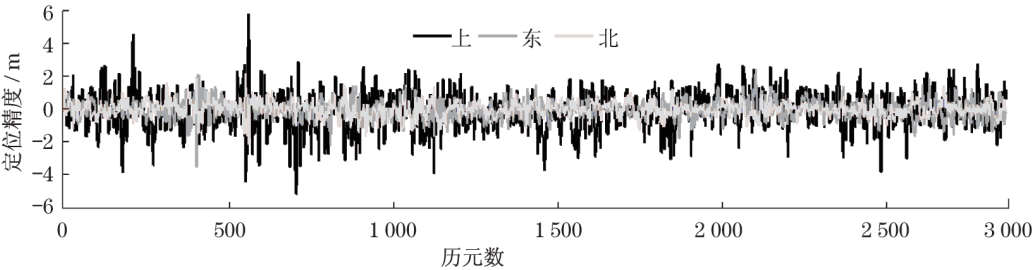


图 3 动态定位结果

Fig.3 Kinematic positioning results

从表 1 可以得到,基于局域参考站网络伪距观测估计卫星钟差,然后采用伪距观测定位时,其定位结果在北、东方向的 RMS 可以达到 0.444 2 m,上向可以达到 1.110 9 m.基于局域参考站网络解算得到的钟差,结果中包含了一些难以用模型改正的误差、系统偏差.采用估计的钟差结果定位时,这些误差、偏差会投影到伪距的定位结果中,可减弱这些难以改正、消除的误差对定位结果的影响,从而提高定位的精度.这一思维可以应用到的类似相位观测定位中,进一步降低相位单站定位中的误差影响,提高定

位精度.

4 结论

定位在北、东、上三个方向对应的 RMS 值分别为:0.444 2,0.522 7,1.110 9 m.基于局域参考站网络伪距观测的卫星钟差估计及实时动态单点定位的实现,对于高精度卫星导航的发展及应用都具有重要的意义.研究发现<sup>[2]</sup>,若以相位观测采用相似于本文实时钟差估计方法的算法进行定位,精度会更高,北、东

两个方向优于 2 cm, 上向优于 4 cm. 随着我国陆态网络的建立, 以及相关服务的逐渐拓展, 基于参考站网络大范围定位服务相关方面的研究尤为重要. 基于参考站网络相位、伪距观测的卫星钟差估计及相应定位技术的实现, 对我国大范围、广域实时定位的实现和使用, 具有一定的现实意义.

#### 参考文献:

- [1] 李浩军. 实时精密单点定位及其相关理论研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2010.  
LI Haojun. The research on real-time precise point positioning and related theory [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2010.
- [2] 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): 1302.  
LI Haojun, WANG Jiexian, CHEN Junping, et al. Realization and analysis of GNSS network based real-time precise point positioning [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(6): 1302.
- [3] Ge M, Gendt G, Dick G, et al. Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions [J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(13): 103.
- [4] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations[J]. Journal of Geodesy, 2007, 82(7): 389.
- [5] 耿涛, 赵齐乐, 刘经楠, 等. 基于 PANDA 软件的实时精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(4): 312.  
GENG Tao, ZHAO Qile, LIU Jingnan, et al. Real-time precise point positioning based on PANDA software [J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2007, 32(4): 312.
- [6] 楼益栋, 施闯, 周小青, 等. GPS 卫星钟差估计与分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(1): 88.  
LOU Yidong, SHI Chuang, ZHOU Xiaoqing, et al. Realization and analysis of GPS precise clock products [J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2009, 34(1): 88.
- [7] Andre' Hauschild, Oliver Montenbruck. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning [J]. GPS Solutions. 2009, 13: 173.
- [8] Li H, Chen J, Wang J, et al. Network based real-time precise point positioning [J]. Adv Space Res, 2010, 46(9): 1218.
- [9] Jensen A, Ovstedal O. The Effect of different tropospheric models on precise point positioning in kinematic model [J]. Survey Review, 2008, 40(308): 173.
- [10] 李浩军, 王解先, 胡丛玮. GPS 对流层延迟的历元间差分分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 448.  
LI Haojun, WANG Jiexian, HU Congwei. Analysis of epoch-difference values of GPS troposphere delay [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 448.
- [11] Yang Y. Robust estimation of geodetic datum transformation [J]. J Geod, 1999, 73: 268.

(上接第 1317 页)

#### 参考文献:

- [1] Klose A, Drexl A. Facility location models for distribution system design [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(1): 4.
- [2] Kir Esnaf, Tarık Küçükdeniz. A fuzzy clustering-based hybrid method for a multi-facility location problem [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2009, 20(2): 259.
- [3] Joseph Harkness, Charles ReVelle. Facility location with increasing production costs [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 145(1): 1.
- [4] Illia Racunica, Laura Wynter. Optimal location of intermodal freight hubs [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2005, 39(5): 453.
- [5] 张三省, 黄立生. 区域性公路运输站场布局与选址方法研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(2B): 97.  
ZHANG Sanxing, HUANG Lisheng. A study of regional highway transportation stations distribution and locations selecting method [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(2B): 97.
- [6] 王来军, 胡大伟, 史忠科. 容量受限型设施定位模型及遗传算法 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(6): 65.  
WANG Laijun, HU Dawei, SHI Zhongke. Model and genetic algorithms applying to a type of constrained facility location problem [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 65.
- [7] 刘灿齐. 交通枢纽选址与网络设计同时优化的模型与算法 [J]. 公路交通科技, 2003, 20(3): 113.  
LIU Canqi. Model of simultaneously optimizing the transport pivot sitting and network design and its algorithm [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(3): 113.
- [8] 黄海军. 城市交通网络平衡分析: 理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.  
HUANG Haijun. Urban transportation network equilibrium analysis: theory and practice [M]. Beijing: China Communications Press, 1994.