

单频精密单点定位电离层延迟处理方法研究^{*}

涂锐 张勤 黄观文

(长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要 单频精密单点定位时, 利用不同映射函数, 引入电离层参数在模型中进行实时电离层延迟估计, 从而达到提高电离层误差修正的目的。通过对 GPS 跟踪站实测数据的计算, 及与常规单层模型、Klobuchar 模型和格网电离层模型结果的比较分析, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 单频精密单点定位; 电离层延迟; 模型改正; 映射函数; 参数估计

中图分类号 P227

文献标识码 A

ON IONOSPHERIC DELAY PROCESSING METHODS FOR SINGLE FREQUENCY PRECISE POINT POSITIONING

Tu Rui, Zhang Qin and Huang Guanwen

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054)

Abstract In single frequency precise point positioning, ionospheric delay is one of the most important factors impacting the positioning accuracy. Because of the instability of the ionosphere and the fuzziness of the research of physical properties, the positioning accuracy is seriously limited when using the precision limited model for the correction. In order to eliminate the ionosphere error, it is proposed to introduce ionosphere parameter for real time ionospheric delay estimation by applying different mapping functions. Through the calculation of measurement data from the GPS tracking station and the comparison among the results from the single model, Klobuchar model and the grid ionosphere model, the feasibility and effectiveness of the new method are verified. In the experiments, different mapping functions and the ionosphere parameters are selected and some significant conclusions are drawn.

Key words single frequency precise point positioning; ionospheric delay; model correction; mapping function; parameter estimation

1 引言

在单频精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技术中, 电离层延迟是影响定位精度的最大误差源之一。因此, 如何精确确定电离层延迟误差, 是提高单频 PPP 技术精度的关键。目前, 解决单频 PPP 中电离层误差的方法有半合模型改正、单层模

型改正、Klobuchar 模型改正、格网改正等^[1-4]。由于影响电离层的因素很多, 不同因素又带有较大的随机性, 常规模型对各因素的相互关系、变化规律及其内部机制描述并不全面, 因此, 利用这些模型得到的电离层延迟并不能达到十分理想的精度^[5,6]。基于上述情况, 本文研究了常规的不同电离层映射函数和延迟函数的特点, 同时提出利用不同投影函数,

^{*} 收稿日期: 2009-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (40902081, 40774001, 40841021); 国家 863 计划项目 (2007AA12Z331)

作者简介: 涂锐, 男, 1985年生, 硕士, 主要从事 GPS 数据处理方面研究工作。E-mail: tuirui-2004@126.com

构造电离层参数对延迟误差进行实时估计,即将电离层参数作为待定参数代入观测方程,同位置参数、模糊度参数等一同求解,从而达到提高修正电离层误差影响的目的。通过 WUHN 和 BJFS 的观测数据,利用新方案与常规的单层模型、Klobuch 模型、格网模型改正的实验结果进行了比较分析,并选取不同映射函数和电离层参数对实验结果进行对比,得出一些结论。

2 单频精密单点定位中电离层参数估计模型

2.1 单频精密单点定位数学模型

在单频精密单点定位中,一般采用半合模型^[7]消除卫星轨道误差、卫星钟差、硬件延迟、对流层延迟、相对论效应等误差,其观测方程为:

$$\begin{cases} C_i = \rho_i^s + cdt + d_{ion} + \varepsilon(C_i) \\ \frac{C_i + \Phi_i}{2} = \rho_i^s + cdt + \frac{\lambda_1 N_i}{2} + \frac{\varepsilon(\Phi_i) + \varepsilon(C_i)}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, C_i 为 C/A 码伪距观测值, Φ_i 为 L_1 相位观测值, ρ_i^s 为站星几何距离, c 为光速, dt 为接收机钟差, d_{ion} 为电离层误差, λ_1 为 L_1 载波波长, N_i 为模糊度参数, $\varepsilon(C_i)$ 与 $\varepsilon(\Phi_i)$ 为观测噪声。

对于式(1)中的电离层误差 d_{ion} , 常规方法采用电离层模型改正^[1-3]。这些模型对影响电离层的各因素间相互关系、变化规律及其内部机制描述并不全面,修正后的电离层仍存在较大的残差。通常单层模型改正效果在 50% 左右; Klobuch 模型在中纬地区能达到 50% ~ 60%, 在高纬和低纬赤道地区由于电离层变化活动剧烈,改善效果更差; 格网模型在当前模型改正中精度最高,也只能达到 70% ~ 80% 改正效果^[8-10]。有限的电离层模型改正精度严重制约了单频精密单点定位的精度,因此,本文提出利用不同映射函数,构造电离层参数对延迟误差进行实时估计,以最大限度地消除电离层误差对定位精度的影响。

2.2 电离层映射函数

1) 三角函数型 SIM 映射函数

三角函数 SIM 映射函数 $F(Z)$ 表达式为^[7]:

$$\sin Z' = \frac{R}{R+H} \sin Z \quad (2)$$

$$F(Z) = \frac{1}{\cos Z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 Z'}} \quad (3)$$

其中, R 为地球半径, H 为单层高度, Z 为测站卫星天顶角, Z' 为穿刺点处的卫星天顶角。

2) 广播星历映射函数

Klobuch 提出一种用于 GPS 广播电离层模型

的投影函数,表达式如下^[7]:

$$\begin{cases} F(E) = 1.0 + 16.0 \times (0.53 - E)^3 \\ F(h) = 1.0 + 0.516 \times (1.6745 - h)^3 \end{cases} \quad (4)$$

式中, E 为卫星高度角(单位为 $^\circ$); h 是卫星高度角(单位为弧度)。

3) 改进的 SIM 映射函数 (MSIM)

为减弱电离层投影函数引起的 TEC 投影差异,欧洲定轨中心 (CODE) 对单层模型的 SIM 投影函数作了部分修正,相应的修正投影函数为^[5]:

$$F(Z) = \frac{1}{\cos Z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 Z'}} \quad (5)$$

其中: $\sin Z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha Z)$, 且 $R = 6371 \text{ km}$, $H = 506.7 \text{ km}$, Z 为观测卫星的天顶距, $\alpha = 0.9782$

4) 电离层 “slab” 映射函数^[3]

$$F(z, \eta) = \frac{Y_{slab}(z, \eta) + Y_{upper}(z, \eta) + Y_{lower}(z, \eta)}{Y_{slab}(0, \infty) + Y_{upper}(0, \infty) + Y_{lower}(0, \infty)} \quad (6)$$

式中, $Y_{slab}(z, \eta)$ 、 $Y_{upper}(z, \eta)$ 、 $Y_{lower}(z, \eta)$ 分别反映 “slab” 层及上下两层的电离层对整个电离层的贡献程度, η 为卫星天顶距, z 为站星距。

此外, Clynch 提出利用最小二乘法拟合求解的 Q 因子投影函数, 欧吉坤提出一种可适应高度角变化而分段取值的电离层投影函数, Cohen 等人^[10]提出了 3 个参数估计的延迟函数等。

SIM 映射函数、广播星历映射函数、MSIM 映射函数都是在单层电离层模型的基础上发展起来的,这些映射函数模型较为简单,但实际工作中很难准确确定单层高度。电离层 “slab” 模型建立了在电离层交叉点处斜向上的 TEC 转化为垂直方向上的 TEC 的投影函数,且投影函数是与卫星高度角有关的比例因子,模型建立较为复杂。

2.3 电离层延迟的函数表达式

电离层延迟采用一个参数估计时,延迟函数为

$$I = F d_{ion}^{enth} \quad (7)$$

其中, F 为电离层映射函数, d_{ion}^{enth} 为引进的未知参数。

电离层延迟采用两个参数估计时,延迟函数为

$$I = F A d_{ion}^A + F E d_{ion}^E \quad (8)$$

其中, F 为电离层映射函数, A 为测站上的卫星方位角, E 为测站上卫星高度角, d_{ion}^A 、 d_{ion}^E 为引进的未知参数。

3 个参数估计的延迟函数为^[10]:

$$I = (1 + \sin \varphi^*) J + \cos \varphi^* \cos \lambda^* C_{11} + \cos \varphi^* \sin \lambda^* S_{11} \quad (9)$$

其中, φ^* 、 λ^* 分别代表太阳共轭坐标系中足下点的

经度和纬度, J 、 C_1 、 S_1 为引入的估计电离层延迟的 3 个未知参数。

不同的电离层参数, 反映电离层映射的分解情况不同。采用一个参数, 只将电离层延迟映射到天顶方向; 采用两个参数, 将电离层延迟分别映射到卫星高度角和卫星方位角方向; 采用 3 个参数时, 将其映射到足下点的三维直角方向。

2.4 电离层参数估计的数学模型

当电离层延迟采用参数估计时, 即是在定位计算中引入电离层参数与位置参数等一起进行估算。在一个测站上, 将电离层延迟用带有未知参数的函数表达式表示, 其数学模型如下:

$$\begin{cases} C_1 = \rho_r + cdt + I + \epsilon(C_1) \\ \frac{C_1 + \Phi_1}{2} = \rho_r + cdt + \frac{\lambda_1 N}{2} + \frac{\epsilon(\Phi_1) + \epsilon(C_1)}{2} \end{cases} \quad (10)$$

其中, I 为带有参数的电离层延迟函数。

3 算例分析

算例数据来自武汉和北京的 GS 连续跟踪站 2005 年 1 月 1 日的观测数据 (WUHN0010 05 ° 和 BJS0010 05 °), 采用自主研发的单频精密单点定位软件进行计算, 并以 GS 站公布的测站坐标作为真值进行精度分析。实验中, 电离层参数每个历元估计一次, 方差为 0.001, 位置参数方差为 0.1 模糊度参数方差为 0.1 接收机钟差参数方差为 30。

3.1 电离层延迟模型改正与参数估计分析

为了对比新方案与直接进行电离层模型改正的结果, 采用以下 4 种电离层处理方案对武汉和北京站的数据进行计算:

1) 直接利用单层模型进行改正;

2) 直接利用 Klobuchar 模型进行改正;

3) 直接利用格网模型进行改正;

4) 采用式 (9) 中的映射函数, 利用三参数法对电离层进行参数改正。

通过 4 种电离层改正方案实验, 计算出收敛后各历元的坐标值, 并与真值比较, 得到武汉站和北京站 X Y Z 方向残差分别如图 1、图 2 所示, 精度统计如表 1 所示。

分析图 1、图 2 和表 1 可以得出:

1) 电离层延迟采用模型改正时, 单层模型和 Klobuchar 模型精度相当, 格网模型精度优于其他两种模型。相比单层模型和 Klobuchar 模型, 武汉站采用格网模型的定位精度在 X Y 方向分别提高 64% 和 61%, Z 方向精度相当; 而北京站 X Z 方向分别提高了 79% 和 14%, Y 方向精度略有降低。

2) 电离层延迟采用参数估计时, 精度明显优于模型改正, 武汉站 X Y 方向分别提高了 92% 和 91%, Z 方向精度和模型改正精度相当; 北京站 X Z 方向提高了 93% 和 50%, Y 方向和 Klobuchar 模型精度相当, 大大优于单层模型和格网模型。

3) 采用参数估计时, X 方向精度提高最快, 武汉站精度提高了 92%, RMS 值从 0.385 m 提高到 0.028 m; 北京站提高了 93%, RMS 值从 0.210 m 到 0.013 m; Y 方向武汉站提高了 0.2 m; 北京站提高了 0.08 m; 在 Z 方向, 武汉站没有改善, 北京站提高了 0.08 m。

总体而言, 通过 4 种方案的结果分析, 采用参数估计的电离层方法精度最高, 其次是采用格网模型改正, 单层模型和 Klobuchar 模型精度相当, 差于参数估计方法和格网模型。

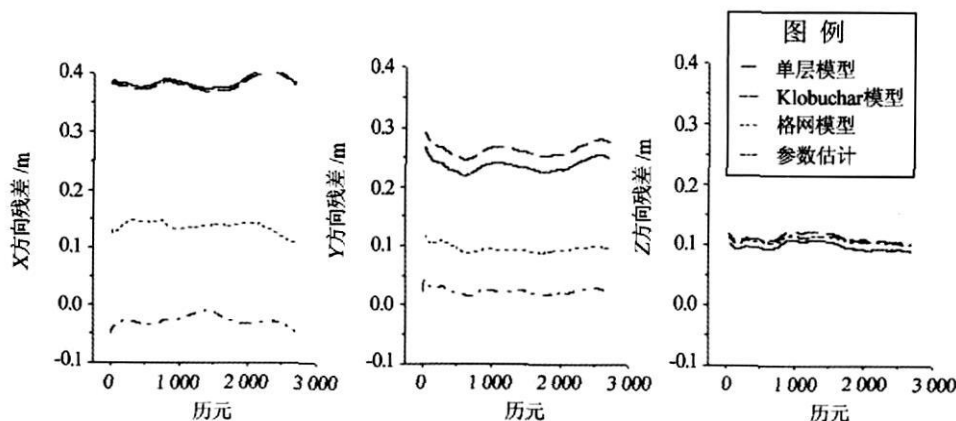


图 1 武汉站 4 种不同方案下 X Y Z 方向的残差

Fig 1 Residuals in X Y Z directions under 4 schemes at WUHN station

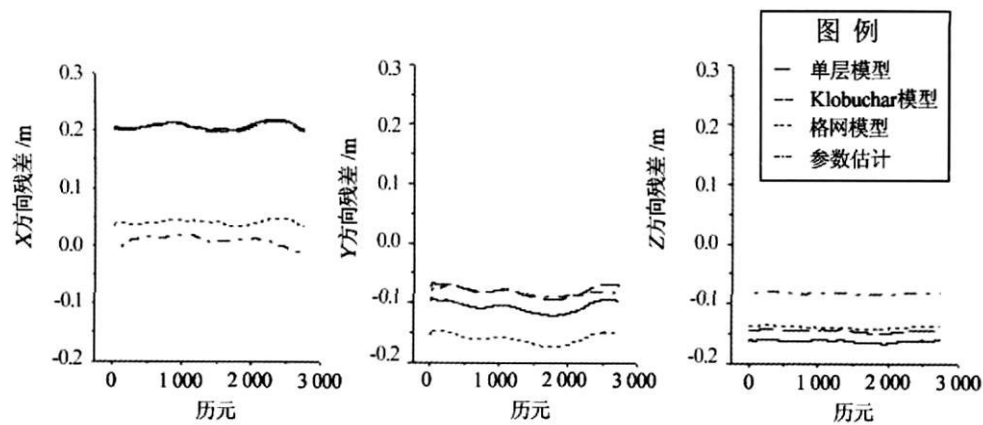


图 2 北京站 4 种不同方案下 X Y Z 方向的残差
Fig 2 Residuals in X Y Z directions under 4 schemes at BJFS station

表 1 4 种方案实验结果与真值比较的均值及中误差 (单位: m)

Tab 1 Mean and RMS of experimental results compared with true values under 4 schemes (unit: m)

点名	方案	Mean(X)	RMS(X)	Mean(Y)	RMS(Y)	Mean(Z)	RMS(Z)
WUHN	方案 1	0.381	0.385	0.234	0.236	0.097	0.098
	方案 2	0.380	0.380	0.262	0.262	0.112	0.112
	方案 3	0.136	0.136	0.095	0.096	0.107	0.107
	方案 4	-0.027	0.028	0.023	0.024	0.109	0.109
BJFS	方案 1	0.210	0.210	-0.106	0.107	-0.162	0.162
	方案 2	0.207	0.208	-0.080	0.081	-0.145	0.145
	方案 3	0.043	0.043	-0.159	0.160	-0.139	0.139
	方案 4	0.011	0.013	-0.082	0.082	-0.082	0.083

3.2 电离层延迟采用不同参数的比较

设计以下 3 种方案分析对比采用不同电离层延迟参数对单频 PPP 定位结果的影响:

- 1) 电离层延迟采用 1 个参数进行估计 (式 7), 采用式 (5) 中 MSIM 映射函数;
- 2) 电离层延迟采用 2 个参数进行估计 (式 8), 采用式 (5) 中 MSIM 映射函数;
- 3) 电离层延迟采用 3 个参数进行估计 (式 9), 采用式 (9) 中的映射函数。

通过 3 种不同参数方案实验, 计算出收敛后各历元坐标值, 并与真值比较, 得到武汉站和北京站 X Y Z 方向残差分别如图 3、图 4, 及精度统计如表 2。

从图 3、图 4 和表 2 中可以得出:

- 1) 电离层延迟改正取不同参数时, 改善效果存在一定差异, 3 个参数最优, 2 个参数略优于 1 个参数;
- 2) 采用 3 个参数时, 武汉站在 X Y 方向分别提高了 7 mm 和 6 mm, Z 方向没有改善; 北京站 3 个方向都改善了 1~2 mm;
- 3) 采用 1 个参数和 2 个参数时的映射函数一

样, 定位结果相当。这一结论说明精确反映电离层物理状态的映射函数是提高电离层参数估计精度的前提。

4 结论与建议

- 1) 电离层物理特性复杂, 限制了模型改正的精度, 在常规模型中格网模型精度最高, 单层模型和 Klobuchar 模型精度相当。通过单频 PPP 实例分析, 武汉站在 X Y 方向分别提高了 64% 和 61%, Z 方向精度相当; 北京站 X Z 方向分别提高了 79% 和 14%, Y 方向精度略有降低。
- 2) 电离层延迟采用参数估计时, 单频 PPP 定位精度明显优于常规模型改正。算例中武汉站 X Y 方向提高了 92% 和 91%, 在 Z 方向和模型改正相当; 北京站 X Z 方向提高了 93% 和 50%, 在 Y 方向和 Klobuchar 模型改正的精度相当, 大大优于单层模型和格网模型; 而且参数估计方法可以实时估计电离层延迟。
- 3) 电离层延迟采用参数估计时, 选择不同的参数, 对精度也有一定的影响。研究表明, 采用 3 个参数估计效果最好, 1 个参数和 2 个参数精度相当。

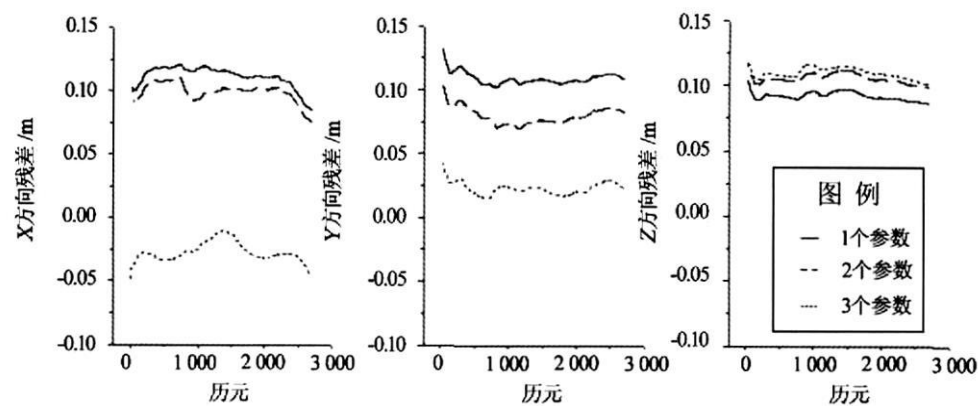


图 3 武汉站 3 种不同参数估计时 X Y Z 方向的残差
Fig 3 Residuals in X Y Z directions under 3 parameter estimation schemes at WUHN station

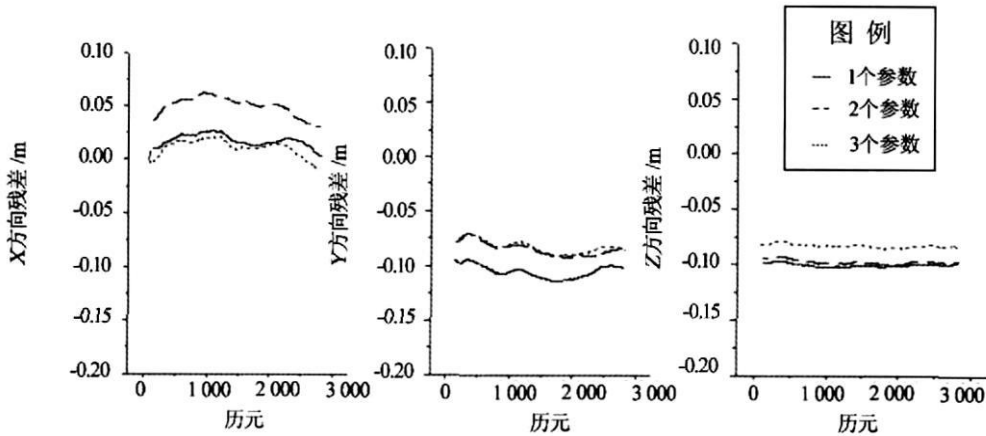


图 4 北京站 3 种不同参数估计时 X Y Z 方向的残差
Fig 4 Residuals in X Y Z directions under 3 parameter estimation schemes at BJFS station

表 2 3 种不同方案实验结果与真值比较的均值及中误差 (单位: m)

Tab 2 Mean and RMS of experimental results compared with true values under 3 parameter estimation schemes (unit: m)

点名	方案	Mean(X)	RMS(X)	Mean(Y)	RMS(Y)	Mean(Z)	RMS(Z)
WUHN	方案 1	0.111	0.111	0.109	0.109	0.092	0.092
	方案 2	0.098	0.099	0.079	0.080	0.105	0.105
	方案 3	-0.027	0.027	0.022	0.023	0.109	0.109
BJFS	方案 1	0.017	0.018	-0.104	0.105	-0.099	0.100
	方案 2	0.049	0.050	-0.084	0.084	-0.097	0.097
	方案 3	0.011	0.013	-0.082	0.082	-0.082	0.083

其本质原因在于选取不同参数时, 电离层映射函数不同, 因此精确的映射函数是正确估计电离层延迟的前提。

参 考 文 献

1 王刚, 魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果[J]. 测绘通报, 2000 (9): 1—2 (Wang Gang and Wei ZiQing. A method and results of setting up Grid ionospheric delay model [J]. Bulletin of Surveying and Mapping 2000 (9): 1—2)

2 章红平, 等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展, 2006 (3): 16—24 (Zhang HongPing et al. Brief review of the ionospheric delay models [J]. Progress In Astronomy, 2006 (3): 16—24)

3 霍星亮. 基于 GNSS 的电离层形态监测与延迟模型研究[D]. 中科院测量与地球物理研究所, 2008 (Huo Xingliang Monitoring of Ionospheric Morphology and Study on Ionospheric Delay Model Based of GNSS [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 2008)

(下转第 108 页)

4 结论

1) HPI的计算值最大为 8 808 m, VPI的最大值为 10 492 m, 分别小于 HAI的 12 m和 VAI的 20 m的限值要求。说明了计算的可行性和有效性。

2) 对于不同的监测站和不同的卫星组, 利用上述算法计算出的 HPI和 VPI的均值分别稳定在 4.4 m和 6.4 m左右, 其标准差最大值和最小值之差在 0.3 m以内, 验证了该算法的稳定性。

3) 在同一组观测卫星下, 在相邻历元间, 计算出的 HPI和 VPI值的变化都在厘米级甚至在毫米级, 只有卫星组中的卫星号发生变化时才会出现分米级的跳跃变化。

由此可知, 该算法能够满足完备性理论中的各项要求, 能够用于预报和监测导航系统的安全状况。

参考文献

- 1 党亚民, 秘金钟, 成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2007 (Dang Yanmin, Bi Jinchong and Cheng Yingyan. Principle and application of global navigation satellite system [M]. Beijing: Press of Surveying and Mapping, 2007)
- 2 Medel C H. SISA computation algorithm and their applica-

- bility for Galileo integrity [R]. Portland: ION GNSS International Meeting of the Satellite Division, 24—27 Sept 2002
- 3 Bömmerhof H and Ehret W. Sensitivity analysis of the Galileo integrity performance dependent on the ground sensor station network [R]. Long Beach: ION GNSS International Meeting of the Satellite Division, 13—16 Sept 2005
- 4 Wu J T & Peak S. An analysis of satellite integrity monitoring improvement for WAAS [R]. Portland: ION GNSS International Meeting of the Satellite Division, 24—27 Sept 2002
- 5 Shively C A and Hsiao T T. Performance and availability analysis of a simple local airport position domain monitor for WAAS [R]. Long Beach: ION GNSS International Meeting of the Satellite Division, 13—16 Sept 2005
- 6 Oehler V. The Galileo integrity concept [J]. Long Beach: ION GNSS 17th International Meeting of the Satellite Division, 21—24 Sept 2004
- 7 Lannebongue S and Lobert B. On the Galileo user integrity computation [R]. Portland: ION GNSS International Meeting of the Satellite Division, 24—27 Sept 2002
- 8 Acklam P J. An algorithm for computing the inverse normal cumulative distribution function [J/OL]. <http://home.online.no/~pjacklam/notes/invnorm/>, 2004

(上接第 103 页)

- 4 霍星明. 单频 GPS接收机定位中的电离层延迟改正 [J]. 测绘技术装备, 2005 (2): 43—45 (Huo Xingming. The correction of ionospheric delay in single frequency GPS receiver positioning [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2005 (2): 43—45)
- 5 吴江飞, 黄城. GPS精密单点定位模型及其应用分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008 (1): 96—100 (Wu Jiangfei and Huang Cheng. GPS precise point positioning models and their utility analysis [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008 (1): 96—100)
- 6 阮仁桂, 郝金明, 张勇. 基于 UoC模型的精密单点定位精度分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009 (6): 104—108 (Ruan Rengui, Hao Jinning and Zhang Yong. Evaluation of precise point positioning with UoC model [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009 (6): 104—108)
- 7 魏子卿, 葛茂荣. GPS相对定位的数学模型 [M]. 北京:

测绘出版社, 1998 (Wei Ziqing and Ge Maorong. The mathematical model of GPS relative positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1998)

- 8 袁运斌, 霍星亮, 欧吉坤. 精确求定 GPS信号的电离层延迟的模型与方法研究 [J]. 自然科学进展, 2006 (1): 40—47 (Yuan Yunbin, Huo Xingliang and Ou Jikun. Models and methods for precise determination of ionospheric delay using GPS [J]. Progress in Nature Science, (1): 40—47)
- 9 史文森, 朱海, 梁洪涛. 基于网格化的电离层延时修正法 [J]. 四川兵工学报, 2008 (6): 37—39 (Shi Wenseng, Zhu Hai and Liang Hongtao. Grid-based ionospheric delay Amendment Act [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2008 (6): 37—39)
- 10 Lao Sheng LN. Remote sensing of ionosphere using GPS measurements [R]. The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, 5—9 November 2001