

文章编号: 1001-1595(2010)05-0478-06

## 基于 GPS 双频原始观测值的精密单点定位算法及应用

张宝成<sup>1,2</sup>, 欧吉坤<sup>1</sup>, 袁运斌<sup>1</sup>, 钟世明<sup>1</sup>

1. 中国科学院 测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

### Precise Point Positioning Algorithm Based on Original Dual-frequency GPS Code and Carrier-phase Observations and Its Application

ZHANG Baocheng<sup>1,2</sup>, OU Jikun<sup>1</sup>, YUAN Yunbin<sup>1</sup>, ZHONG Shiming<sup>1</sup>

1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: A precise point positioning (PPP) algorithm based on original dual-frequency GPS code and phase observations is presented. Instead of forming the ionosphere free code and phase observations as usually done for standard PPP algorithm, by taking the dispersive property of ionosphere into account, the first order ionospheric delay effects of L1 frequency along satellite receiver line of sight (LOS) are incorporated into the state vector which is estimated by extended Kalman filter (EKF) technique. This alternative algorithm could avoid the adverse effect of amplified multipath and measurement errors existing in the ionosphere-free observations. In the meantime, several constraints can be introduced to the LOS ionospheric delay parameters during the filtering process, to improve the convergence of the filter to more reliable and precise solutions. The LOS ionospheric delays could be obtained simultaneously with other unknown parameters, which would facilitate the research on ionosphere at a single site. Besides, the recursive DIA procedure is adopted as quality control strategy to guarantee the reliability of the estimators from the proposed PPP implementations. The performance of proposed algorithm is evaluated for different positioning applications: static, low dynamic and high dynamic test, and a positioning accuracy of about 1~2 cm and 7~8 cm can be achieved respectively for static and kinematic positioning. The convergence behavior and repeatability of filtered solutions can be well improved by comparing the positioning performance of proposed and standard PPP implementations for low dynamic test.

Key words: precise point positioning (PPP); GPS dual-frequency observations; extended Kalman filter; LOS ionospheric delay

摘 要: 提出一种基于 GPS 双频原始观测值的 PPP 算法。与基于消电离层组合观测值的传统 PPP 算法不同, 鉴于电离层的弥散特性, 本文算法参数化 L1 频率上的站星视线方向电离层延迟, 可有效避免传统 PPP 方法中观测值组合过程所引起的观测噪声以及多路径效应被放大的不利影响。同时在利用扩展卡尔曼滤波模型进行未知参数的递归估计过程中, 通过对大气延迟参数引入符合实际的约束, 可以加快滤波收敛, 提高参数估值的可靠性, 视线方向电离层延迟可与其余未知参数同时估计得到, 进而便于利用 PPP 技术进行单站电离层的提取和精密建模, 此外, 对于可能的模型误差(如码观测值粗差、相位观测值周跳等), 基于 DIA 的质量控制策略以消除或削弱其对参数估值的不利影响。利用实测数据对算法在静态、低动态以及高动态定位应用方面的精度进行检验, 结果表明, 静、动态定位结果的外符合精度可分别达到 1~2 cm 和 7~8 cm。通过比较两种 PPP 算法在低动态试验中的定位结果, 表明本文算法能显著地减少滤波收敛时间, 提高滤波收敛解的稳定性, 进而验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 精密单点定位; GPS 原始观测值; 扩展卡尔曼滤波; 视线方向电离层延迟

中图分类号: P228 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40874009, 40890160); 国家杰出青年科学基金(40625013); 国家 863 计划(2007AA12Z311, 2007AA12Z305); 武汉大学 卫星导航与定位教育部重点实验室(B类)开放基金(GRG 2009001)

## 1 引 言

PPP 技术是一种基于单个 GPS 接收机的双频观测数据、利用 IGS 发布的精密星历及钟差产

品, 并对观测值中影响在厘米级以上的系统误差, 如相对论效应、相位缠绕(phase wind-up)等进行改正, 进而精确确定全球任一点位置的方法, 其定位精度可达分米甚至厘米级的水平<sup>[1-2]</sup>。除位置

参数外, 接收机钟差、对流层天顶延迟亦可被同时估计得到, 进而使得该项技术在坐标框架的维持、高精度导航定位<sup>[3-4]</sup>、大气延迟提取及时间传递等领域均具有广阔的应用前景<sup>[2-7]</sup>。

传统 PPP 方法的数学模型中一般采用消电离层组合码、相观测值以避免电离层延迟对定位的不利影响<sup>[1-3]</sup>, 但该观测值的组合过程却放大了观测噪声和多路径效应的影响。此外, 分别形成消电离层组合的码、相位观测值造成了有用信息的浪费, 原因在于电离层延迟分别经过了码和相位组合观测值的消除<sup>[8]</sup>。不仅如此, 利用观测数据组合方法消除电离层延迟的影响等价于将该延迟作为一种时变参数加以估计, 其忽略了电离层延迟历元间变化的平稳性对 PPP 滤波过程的有利影响, 进而影响了滤波结果的收敛性<sup>[8]</sup>。由于电离层延迟在观测域中被事先消除, 利用传统 PPP 方法进行电离层延迟的提取和研究一般只能基于分步处理的方式进行<sup>[5-6]</sup>, 进而增加了计算负担。

鉴于上述传统 PPP 算法的诸多不利条件, 本文提出了一种基于 GPS 原始观测数据的 PPP 算法以避免其影响。该算法主要特点为: ① 有效避免了观测数据组合过程所引起的观测噪声和多路径效应被过分放大的不利影响, 亦避免了电离层延迟参数被二次消除所导致的有效信息缺失; 对于观测方程中部分参数 (如硬件延迟、电离层延迟、接收机钟差等) 之间存在线性相关的不利影响, 通过参数合并的方法加以消除<sup>[9]</sup>; ② 待估参数分别为测站位置、天顶对流层延迟、L1 频率站星视线方向的电离层延迟、双频模糊度以及接收机钟差参数, 分别将两类大气延迟模型化为具有随机游走特性的参数, 以便合理地利用其历元间变化较为平稳的特性<sup>[9-10]</sup>, 以期有效缩短滤波收敛时间, 提高滤波估值结果的可靠性; ③ 对于观测数据中可能存在的粗差或周跳, 采用 DIA 质量控制方法实时探测、辨识并消除或削弱该模型误差对参数估计结果的不利影响, 进而提高参数估值的可靠性<sup>[11]</sup>; ④ 较之传统 PPP 方法, 新算法能同时估计得到站星视线方向包含卫星和接收机仪器偏差影响的电离层斜延迟, 从而有效避免基于传统 PPP 方法研究电离层延迟的分步数据处理模式, 进而提高了计算效率, 拓展了 PPP 技术的应用范围。

## 2 滤波模型及质量控制策略

在该 PPP 算法中, 基于扩展卡尔曼滤波模型

进行参数的递归估计。本节对该模型的主要组成部分, 观测方程、状态方程以及相应的随机模型分别做简要的介绍; 重点描述新算法函数模型中的秩亏问题以及消除该秩亏的方法; 简要描述各类状态参数的动态变化特性以及所采用的实时质量控制策略。

### 2.1 观测方程

基于 GPS 原始观测值的线性化观测方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{r,j}^s(i) &= -\mathbb{W}^s(i) \Delta r + m f_{r,j}^s(i) Z(i) + dt_r(i) + \\ &\quad I_{r,j}^s(i) + B_{r,j}^s + B_{r,j} + \varepsilon_p(i) \\ \Delta \phi_{r,j}^s(i) &= -\mathbb{W}^s(i) \Delta r + m f_{r,j}^s(i) Z(i) + dt_r(i) - \\ &\quad I_{r,j}^s(i) + \lambda_j M_{r,j}^s + \varepsilon_\phi(i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中,  $\Delta p_{r,j}^s(i)$ 、 $\Delta \phi_{r,j}^s(i)$  分别表示历元  $i$  测站  $r$  至卫星  $s$  第  $j$  个频率“观测减计算”的码、相位观测值, 观测值中的系统误差如卫星轨道和钟差、相位缠绕、潮汐效应、卫星与接收机天线相位中心偏差及变化等均已改正;  $\mathbb{W}^s(i)$  为测站到卫星的单位方向矢量;  $m f_{r,j}^s(i)$  表示天顶对流层延迟  $Z(i)$  的投影函数;  $\Delta r$  为测站近似位置的改正数;  $dt_r(i)$  表示接收机钟差改正数;  $M_{r,j}^s$  为包含了初始相位偏差的非整相位模糊度;  $B_{r,j}^s$ 、 $B_{r,j}$  分别为卫星和接收机频率有关的硬件延迟;  $I_{r,j}^s(i)$  表示第  $j$  个频率站星视线方向的电离层延迟, 鉴于电离层的弥散效应, 该延迟对不同频率观测值的影响具有如下的关系:

$$\left. \begin{aligned} I_{r,j}(i) &= \mathbb{W} I_{r,k}(i) \\ \mathbb{W} &= \lambda_j^2 / \lambda_k^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中,  $\lambda_j$  表示频率  $j$  相位观测值的波长。

假定在历元  $i$ , 测站  $r$  同时观测到  $m$  颗卫星, 联合所有卫星类似于 (1) 的观测方程, 可以得到如下的观测方程:

$$y(i) = A(i)X(i) + \varepsilon_y, \quad \varepsilon_y \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_y) \quad (3)$$

其中:

$$y(i) = \begin{bmatrix} [P_1(i)^T, & P_2(i)^T] \\ [\Phi_1(i)^T, & \Phi_2(i)^T] \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$P_j(i) = [\Delta p_{r,j}^1(i), \dots, \Delta p_{r,j}^m(i)]^T \quad (5)$$

$$\Phi_j(i) = [\Delta \phi_{r,j}^1(i), \dots, \Delta \phi_{r,j}^m(i)]^T \quad (6)$$

对于双频观测而言,  $y(i)$  中包含了  $4m$  个观测值; 观测误差  $\varepsilon_y$  服从正态分布, 其均值和协方差矩阵分别为  $\mathbf{0}$  和  $\mathbf{Q}_y$ 。

显而易见,在式(1)中,站星硬件延迟、电离层延迟、双频模糊度以及接收机钟差参数之间存在线性相关,进而导致对应的设计矩阵  $A(i)$  中存在秩亏。基于参数合并方法<sup>[13]</sup>可以有效克服该秩亏的不利影响,得到的满秩设计矩阵和可估参数可分别表示为

$$A_{\text{full-rank}}(i) = \begin{bmatrix} \begin{matrix} e_2 \\ e_2 \end{matrix} \otimes B(i), & \begin{matrix} e_2 \\ e_2 \end{matrix} \otimes e_m, \\ \begin{matrix} \mu \\ -\mu \end{matrix} \otimes I_m, & \begin{matrix} 0 \\ \Gamma \end{matrix} \otimes I_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B(i) = \begin{bmatrix} -\mu^1(i) & mf^1(i) \\ \vdots & \vdots \\ -\mu^m(i) & mf^m(i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X_{\text{estimable}}(i) = [\Delta r(i)^T, Z(i), \delta_{tr}(i), \mu_{r,1}(i)^T, N_{r,j}^s]^T \quad (9)$$

(s = 1, \dots, m, j = 1, 2)

其中,  $\otimes I_m$  和  $e_2$  分别表示克罗内克积、 $m$  维单位矩阵以及各元素均为 1 的二维列向量;  $\Gamma$  为二维对角阵,其对角元为不同频率 GPS 观测值的波长因子。

$$\Gamma = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2) \quad (10)$$

式(9)中各参数的含义分别为:接收机近似位置改正数、测站天顶对流层延迟、参数合并后的接收机钟差、L1 频率视线电离层延迟以及模糊度参数。上述电离层延迟参数的具体形式为

$$\mu_{r,1}^s(i) = I_{r,1}^s(i) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(B_r + B^s) \quad (11)$$

其中,  $B^s = B_{s,1}^s - B_{s,2}^s$  和  $B_r = B_{r,1} - B_{r,2}$  分别为卫星和接收机的仪器偏差参数。限于篇幅,包含站星硬件延迟影响的接收机钟差  $\delta_{tr}(i)$  和模糊度参数  $N_{r,j}^s$  具体形式不再具体列出。

值得注意的是,当利用 GPS 技术反演电离层时,式(11)中的结果同样可以采用无几何影响相位平滑伪距组合观测值得到<sup>[12]</sup>。正如[13]所指出,该基于相位平滑伪距的估值并非严格意义上的最小二乘估值,尤其是当卫星数存在冗余时,故该估值并非最优。而式(11)中的对应结果是基于严格的最小二乘方法得到,具有统计最优的特性,从而使得对应的结果具有更高的内符合精度。利用该 PPP 算法可以得到更为精确的电离层延迟估值,进而利于精密电离层建模和站星仪器偏差特性的研究。

观测值的协方差矩阵  $Q$ , 可用于衡量各类观测值的精度及其相关性。若仅考虑观测值标准差的高度角相关性并忽略各类观测值之间可能的交

互相关及时间相关性,此时  $Q$  为一个对角矩阵,其对角元可以表示为

$$Q_i = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2(E_r^s)} \quad (12)$$

其中,  $E_r^s$  为每颗卫星的高度角;  $\sigma_0$  是天顶方向观测值的标准差,对于码和相位观测值而言,其值可分别选取为 0.3 m 和 0.003 m。

## 2.2 状态方程

利用扩展卡尔曼滤波模型,状态方程可以表示为

$$X(i+1) = \Phi_{+1,i} X(i) + \omega(i), \quad \omega \sim N(0, Q_\omega) \quad (13)$$

$$\Phi_{+1,i} = \begin{bmatrix} P_{3 \times 3} & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 0 & & \\ & & & I_{m \times m} & \\ & & & & I_{2m \times 2m} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Q_\omega = \begin{bmatrix} q_{p,3} \Delta t & & & & \\ & q_z \Delta t & & & \\ & & q_r \Delta t & & \\ & & & q_{s,3} \Delta t & \\ & & & & 0_{2m \times 2m} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $X(i)$  和  $X(i+1)$  分别表示相邻历元的状态向量;  $\Phi_{+1,i}$  为对应的状态转移矩阵;  $\omega$  为服从正态分布的过程噪声,其均值和协方差矩阵分别为  $0$  和  $Q_\omega$ ;  $\Delta t$  为相邻历元的时间间隔。式(14)中的  $P$  矩阵表示位置参数的转移矩阵,在静态或动态定位的条件下,其分别为单位阵或零矩阵,亦即此两种条件下,位置参数历元间的变化分别被模型化为时不变或时变参数;式(14)中的其余矩阵分别对应于天顶对流层延迟、接收机钟差、电离层延迟以及模糊度参数的转移矩阵,其中,两类大气延迟参数均被模型化为随机游走过程,钟差和模糊度参数模型化为时变和时不变参数;各类状态参数的谱密度(矩阵)如式(15)所示,其具体的取值依实际情况而定,例如对于动态定位而言,位置参数谱密度的取值取决于载体运动状态;各类大气延迟参数的谱密度(矩阵)则根据大气条件的变化特性进行确定。

## 2.3 质量控制策略

在采用扩展卡尔曼滤波方法实时递归估计

PPP 参数的过程中, 对于可能出现的模型误差, 如码观测值的粗差或相位观测值中的周跳, 采用 DIA 的质量控制策略以克服上述模型误差对参数估值的不利影响。该方法基于滤波新息向量构造统计检验量, 通过探测、辨识以及修正三个主要的步骤以实现递归质量控制。该方法具有较强的可靠性, 研究表明甚至能探测到 1 周以内的相位观测值周跳<sup>[14]</sup>。该方法的实施过程、内外部可靠性以及应用于 GPS 数据处理方面的详细论述, 读者可参阅文献[11, 14]等。

为验证该质量控制策略的有效性, 处理了 2006 年 3 月 1 日共 24 h 的静态观测数据, 数据采样间隔为 30 s, 接收机类型为 Leica GRX1200 PRO, 实际数据处理中采用静态仿真动态的策略, 此种条件下, 静态数据中的可能模型误差将对位置估值具有更明显的影响, 进而更便于实施质量控制有效性的检验。

图 1 中给出了实施 DIA 质量控制策略前后, 北东天三维坐标分量的滤波估值与测站坐标参考值之间的差异, 在实施 DIA 的过程中, 基于局部总体检验模型, 显著性水平  $\alpha$  选取为 2.5%。从图中显见, 若不实施质量控制, 部分时刻由于数据中的模型误差影响, 使得对应的坐标估值结果的偏差可达到米级。当实施 DIA 的质量控制策略以后, 各坐标分量估值具有较明显的可重复性, 经过约 1 h 的滤波收敛, 北东天三分量的外符合精度可分别达到 4 cm、4 cm 和 8 cm。

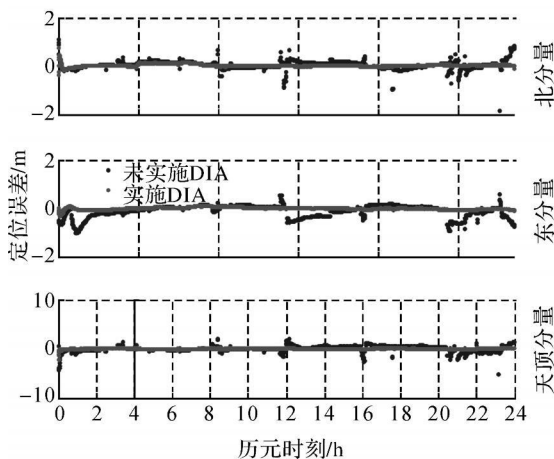


图 1 实施 DIA 质量控制策略前后北东天三维坐标分量滤波值与测站参考值的差值

Fig. 1 The discrepancy between the North, East and Up coordinate components with the reference value before and after DIA procedure

### 3 实验与结果分析

分别从静态、低动态以及高动态定位实验所能达到的精度方面验证了该 PPP 算法的有效性; 数据处理均采用 IGS 15 min 间隔的精密星历和 5 min 间隔的钟差产品, 卫星截止高度角选取为  $5^\circ$ , 对流层先验改正模型为 UNBm 模型, 投影函数选取为 GMF 函数; 对流层天顶延迟和视线电离层延迟的过程噪声谱密度分别选取为  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{min}$  和  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{min}$ 。

分别利用三种观测条件下的实验数据对该 PPP 算法在定位方面所能达到的精度进行了检验: 静态、船载低动态以及机载高动态实验, 该三种观测条件涵盖了利用 PPP 方法进行定位的最主要应用, 各观测数据的具体描述如表 1 所示。

表 1 定位实验数据描述

Tab. 1 Summary of datasets used for positioning test

实验类型	载体	采样间隔/s	观测时段
静态	IGS TWTF 站	30	2006 03-01 00:00—23:45
低动态	测量船	0.5	2008 04-18 8:00—15:00
高动态	飞机	1	2005 05-12 12:00—16:00

为便于验证本文 PPP 算法定位结果的准确性, 采用 IGS 发布的 TWTF 测站坐标作为对应参考值, 动态定位实验的运动轨迹“真值”则基于 Novatel 公司开发的后处理软件 GrafNav/ GrafNet, 利用动态相对定位模式计算得到, 其精度约为 1 dm。图 2 中给出了三种实验的定位误差结果, 滤波收敛后的定位误差统计性质如表 2 所示。

基于图 2 和表 2 的结果, 当利用该 PPP 算法进行定位计算时, 可以得到如下的初步结论:

- ① 三种定位实验均具有较短的收敛时间, 分别为 50 min、54 min 和 34 min, 滤波收敛后, 静态定位的外符合精度可分别达到 1~2 cm 和 7~8 cm;
- ② 利用该 PPP 算法得到的位置估值偏差在两种定位条件下分别不超过 1 cm 和 6 cm, 其中动态定位结果的偏差可能源于 PPP 与 GrafNav/ GrafNet 软件在数据处理策略上的差异;
- ③ 表 2 中的标准偏差可用于衡量滤波收敛的稳定性, 显见, 两种定位条件下, 滤波收敛后的定位结果稳定性可分别达到 1~1.5 cm 和 5~6 cm;
- ④ 所实施的动态试验不仅包含了低动态的海上船载实验, 同时

亦包含了高动态的机载试验, 均能达到满意的定位精度。

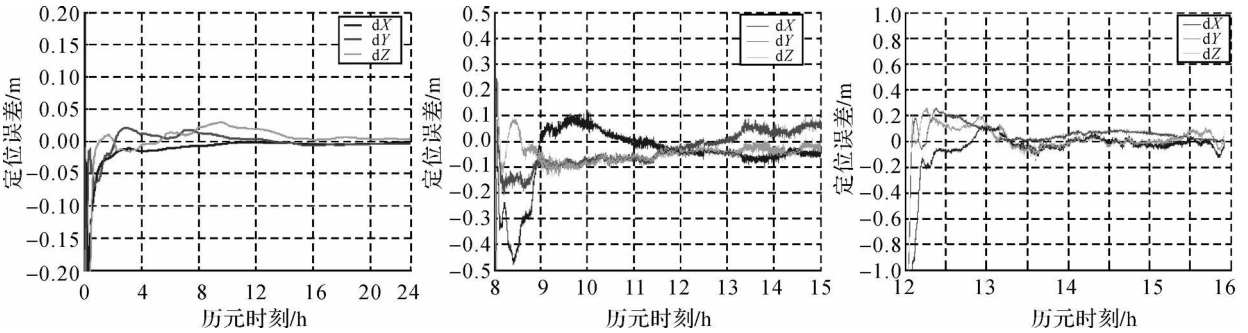


图 2 PPP 位置解误差的静态(a), 船载低动态(b) 以及机载高动态(c) 实验

Fig. 2 Accuracy of the PPP solutions for three positioning tests: static test (a), offshore kinematic test (b) and airborne test (c)

表 2 PPP 各坐标分量定位误差的统计性质

Tab. 2 Summary statistics of component errors for three tests

/ cm

坐标分量	静态试验			船载低动态实验			机载高动态试验		
	偏差	标准差	RMS	偏差	标准差	RMS	偏差	标准差	RMS
dX	- 0.78	0.78	1.10	- 1.45	4.66	4.88	- 1.33	4.62	4.80
dY	0.05	1.22	1.22	- 2.29	5.31	5.78	5.91	4.89	7.67
dZ	0.75	1.05	1.29	- 5.39	2.53	5.96	1.97	6.08	6.39

此外, 图 3 中分别列出了本文 PPP 算法与传统 PPP 算法处理船载数据的定位误差结果。从图中显见, 新算法不仅能够有效减少各坐标分量解的滤波收敛时间, 同时, 滤波收敛解的稳定性亦得到改善。

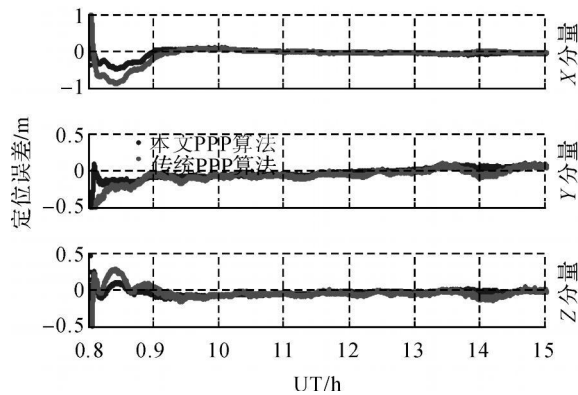


图 3 基于本文 PPP 算法和传统 PPP 算法的船载定位误差比较

Fig. 3 Positioning accuracy of offshore kinematic test for respectively proposed and standard PPP implementations

### 4 结论

本文提出一种基于 GPS 原始观测数据的双频 PPP 算法。较之于传统 PPP 方法, 新算法具

有如下的优势: ① 直接采用非组合原始观测可以避免观测值组合过程的多路径效应及观测噪声被放大的不利影响, 充分利用了原始观测数据中的有用信息; ② 将电离层延迟参数模型化为随机游走过程, 进而能够有效的加速滤波收敛, 提高参数估值的精度和可靠性; ③ 包含站星仪器偏差影响的视线方向电离层延迟参数可以连同其余参数一起估计得到, 因而本文的 PPP 新算法研究电离层延迟具有更高的效率和精度, 有良好的应用前景。

通过实验分析表明, 本文提出的 PPP 方法在静态定位实验中可分别实现 1~ 2 cm 以及 7~ 8 cm 的精度, 进而表明了该 PPP 方法在定位应用中的高精度和可靠性。新算法得到的视线方向电离层延迟具有较之基于相位平滑伪距技术得到的对应结果更高的内外符合精度, 从而更有利于利用 GPS 技术进行高精度的电离层研究。

### 参考文献:

[1] KOU BA J, HÉROUX H. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solutions, 2001, 5 (2): 12-28.

[2] ZUMBERGE J, HEFLIN M, JEFFERSON D, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.

- [3] ABDEL-SALAM M. Precise Point Positioning Using Urr differenced Code and Carrier Phase Observations [ D ]. Calgary: University of Calgary, 2005.
- [4] ZHANG X H, FORSBERG R. Assessment of Long range Kinematic GPS Positioning Errors by Comparison with Airborne Laser Altimetry and Satellite Altimetry [ J ]. Journal of Geodesy, 2007, 81(3): 20F 211.
- [5] ABDEL-SALAM M, GAO Y. Precise GPS Atmosphere Sensing Based on Urr differenced Observations[ C ] // Proceedings of ION National Technical Meeting. California: [ s. n. ], 2004: 933-940.
- [6] CHEN W, HU C W, GAO S, et al. Absolute Ionospheric Delay Estimation Based on GPS PPP and GPS Active Network [ C ] // Proceedings of the 2004 International Symposium on GNSS/GPS. Sydney: [ s. n. ], 2004.
- [7] ORGIAZZI D, TAVELLA P, LAHAYE F. Experimental Assessment of the Time Transfer Capability of Precise Point Positioning(PPP)[ C ] // Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Vancouver: [ s. n. ], 2005: 337-345.
- [8] KESHIN M O, LE A Q, MAREL H. Single and Dual frequency Precise Point Positioning: Approaches and Performance[ C ] // Proceedings of the 3rd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies. Noordwijk: NAVITEC, 2006: 1F 13.
- [9] ODIIK D. Fast Precise GPS Positioning in the Presence of Ionospheric Delays [ D ]. Delft: Delft University of Technology, 2002.
- [10] SCHUELER T, HEIN G W, ELISSFELLER B. GNSS Zenith Wet Delay Estimation Considering Their Stochastic Properties[ C ] // Proceedings of GNSS ' 99, 3rd European Symposium. Genua: [ s. n. ], 1999.
- [11] SALZMANN M. Least Squares Filtering and Testing for Geodetic Navigation Applications [ D ]. Delft: Delft University of Technology, 1993.
- [12] YUAN Y B, HUO X L, OU J K. Models and Methods for Precise Determination of Ionospheric Delay Using GPS [ J ]. Progress in Natural Science, 2007, 17(2): 187-196.
- [13] TEUNISSEN P J G. The GPS Phase adjusted Pseudorange [ C ] // Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation. Stuttgart: Dummlers Verlag, 1991: 115-125.
- [14] TEUNISSEN P J G. Minimal Detectable Biases of GPS Data[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(4): 236-244.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2009-09-02

修回日期: 2009-12-04

第一作者简介: 张宝成(1985—),男,博士生,研究方向为精密单点定位(PPP)与网络RTK技术的应用。

First author: ZHANG Baocheng (1985—), male, PhD candidate, majors in applications of precise point positioning and network based RTK.

E mail: cha m@ asch. whigg. ac. cn

(上接第477页)

- 院,陆全. TOEPLITZ矩阵类的快速算法[M]. 西安:西北工业大学出版社,2001:3F 33.)
- [20] HANSEN P C. The Truncated SVD as a Method for Regularization: NA-M 86-36 [ R ]. Stanford: Stanford University, 1986, 27: 534-553.
- [21] WANG Zhenjie. Regularization of Ill posed Problems in Surveying[ M ]. Beijing: Science Press, 2006. (王振杰. 测量中不适定问题的正则化解法[ M ]. 北京:科学出版社,2006.)
- [22] HANSEN P C. Analysis of Discrete Ill posed Problems by Means of L- curve [ J ]. SIAM Review, 1992, 34(4): 561-580.
- [23] PAVILIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM 2008 [ R ]. Vienna: 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, 2008.
- [24] ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong. EGM2008 and Its Application Analysis in Chinese Mainland[ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. (章传银,郭春喜,陈俊勇. EGM2008地球重力场模型在中国大陆适用性分析[ J ]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.)
- [25] WU Xing, ZHANG Chuanding, YE Xiusong, et al. Simulation of Satellite Gravity Gradient Tensor Observations[ J ]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2008, 25(6): 39F 395. (吴星,张传定,叶修松,等. 卫星重力梯度数据的模拟研究[ J ]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(6): 39F 395.)
- [26] WU Xing, ZHANG Chuanding, ZHAO Dongming. Generalized Torus Harmonic Analysis of Satellite Gravity Gradients Component[ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(2): 10F 107. (吴星,张传定,赵东明. 卫星重力梯度分量的广义轮胎调和分析方法[ J ]. 测绘学报, 2009, 38(2): 10F 107.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2009-07-16

修回日期: 2010-03-02

第一作者简介: 吴星(1979—),男,博士,工程师,研究方向为大地测量学与测量工程。

First author: WU Xing(1979—), male, PhD, engineer, majors in Geodesy and Surveying Engineering.

E mail: wuxing1979@ 163. com