

CHAMP 卫星的纯几何定轨及动力平滑中的动力模型补偿研究

刘经南¹ 赵齐乐¹ 张小红²

(1 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 探讨了利用 CHAMP 卫星星载 GPS 数据实现纯几何 PPP 定轨的方法, 对该几何轨道的动力平滑过程进行了分析, 提出了增加非参数项吸收动力模型误差的半参数动力平滑方法。

关键词: CHAMP; 精密定轨; PPP; 动力平滑; 半参数法

中图分类号: P228.4

CHAMP (challenging minisatellite payload) 计划由德国波茨坦地球科学研究中心(GFZ)提出并付诸实施, 目的是利用其大量近地观测精化重力场模型, 同时开展地球电磁场和大气环境方面的研究。鉴于上述目的, CHAMP 卫星采用超低高度、近极轨道的专用轨道设计。此近地轨道对周围的环境更敏感, 有利于重力场和电磁场的恢复以及大气重要参数的获取; 但轨道越低, 受上述动力环境的影响越大, 其重力场模型和非保守力, 特别是大气阻力模型就越难以模拟或者估计, 这大大增加了 CHAMP 卫星精密定轨, 特别是动力学定轨的难度。

自 2000 年 7 月 15 日 CHAMP 卫星成功发射以来, 已经积累了大量可用于精密定轨的数据, 其连续的星载 GPS 观测, 使多种定轨方法成为可能, 代表性的有附加多经验参数的动力法轨道^[1]、求解随机过程的简化动力轨道^[2]和基于 GPS 差分技术的纯几何轨道^[3]等。它们通过增加动力模型补偿机制或者回避动力模型的约束来克服卫星低轨带来的困难。尽管如此, 卫星动力模型越粗糙, 前两种方法得到的轨道精度将越低。纯几何法虽然不受动力模型的影响, 但其轨道过分依赖观测值质量, 可靠性不够。因此, 能充分利用卫星动力信息与观测值的几何信息, 并使之达到最佳匹配, 是定轨追求的理想目标。

利用星载 GPS 实现低轨卫星定轨, 从 GPS 精

密星历及钟差的获取方式上可分为以下 3 种情况: ① 直接获取 IGS 产品^[4]; ② 利用大量的全球地面观测, 首先进行 GPS 卫星本身的定轨, 然后再实现低轨卫星定轨; ③ 将地面站、GPS 卫星和低轨卫星一起估计。后两者虽然不受 IGS 星历和钟差插值误差的影响, 所得的精度会更高, 但要同时处理大量的地面站数据, 软件设计复杂, 计算工作量巨大。尤其是情况③, 目前只有德国 GFZ 能给出相应结果^[5]。本文主要探讨快速简化的定轨过程, 因此采用了第一种方式。本文通过非差单点定位 (PPP) 得到纯粹的几何学轨道, 然后通过附加经验参数的方法对 PPP 轨道进行平滑, 最后探讨了利用半参数估计方法补偿动力模型误差的可行性。

1 CHAMP 卫星的 PPP 定轨

1.1 观测方程

采用双频无电离层组合观测值组成观测方程:

$$l_P = \rho + c(d_t - d_r) + \epsilon_P \quad (1)$$

$$l_\Phi = \rho + c(d_t - d_r) + A_m + \epsilon_\Phi \quad (2)$$

式中, l_P 为 P_1 、 P_2 的无电离层伪距组合观测值; l_Φ 为 L_1 、 L_2 无电离层相位组合观测值 (距离); d_t 为 LEO 星载 GPS 接收机钟差; d_r 为 GPS 卫星钟

差; c 为真空中的光速; A_m 为无电离层组合相位观测值(距离)的模糊度(不具有整数特性); ϵ_p 和 ϵ_ϕ 分别为两种组合观测值的观测噪声和多路径误差; ρ 为 LEO($X_{LEO}, Y_{LEO}, Z_{LEO}$)和 GPS(X_S, Y_S, Z_S)卫星间的几何距离:

$$\rho = \sqrt{(X_S - X_{LEO})^2 + (Y_S - Y_{LEO})^2 + (Z_S - Z_{LEO})^2} \quad (3)$$

低轨卫星的 GPS 观测值不受中性大气延迟的影响,所以式(1)、式(2)的右边不含对流层延迟误差改正项。此外, GPS 卫星钟差和轨道采用 IGS 事后精密钟差和轨道产品。估计的参数包括 LEO 卫星三维坐标、LEO 卫星钟差和无电离层非差相位组合模糊度(实数解)。

事后精密单点定位的数学模型已较为成熟^[6,7]。数据处理用最小二乘估计方法进行参数估计,不对定轨进行滤波等平滑处理,直接给出每历元的精密单点定位结果。

1.2 GPS 数据处理策略

1.2.1 定权策略

根据高度角定权:

$$P_i = \sin^2 e_i$$

式中, P_i 为观测值的权; e_i 为卫星高度角。

1.2.2 卫星截止高度角的选取

星载 GPS 接收机在对 GPS 卫星进行跟踪观测时,一般不存在障碍物的遮挡,往往处于 0° 高度角的卫星也能接收到观测值,甚至有个别卫星的观测高度角为负值。一般来说,观测高度角越低,对应的观测值的质量越差,所以在处理时,需要选取一个合适的截止高度角。高度角选取过大,会屏蔽一些有用卫星的观测值参与定位,并使得卫星几何强度变差,影响定位结果;截止高度角选取过小会引入质量差的观测值,损坏定位精度。本文为了保证足够的观测卫星数及卫星几何图形强度,截止高度角设为 5° 。对于高度角大于 5° 的卫星,采用下面的办法剔除质量差的观测值。

1.2.3 数据预处理

数据的预处理是能否获得连续弧段高精度定位结果的关键之一,它主要包括野观测值的剔除和周跳的探测与修复。野观测值的剔除可以直接根据观测值间的某种特定关系,设置一定的阈值,让不好的观测值不参与定位计算;还可以采用残差分析法剔除野观测值,残差分析法是数据处理中粗差剔除的一种非常有效的方法。

非差定位中观测值周跳的探测与修复要比差

分定位模式更为困难。CHAMP 星载 GPS 接收机采用双频双 P 码接收机,至少可以采集到四类观测值: L_1 、 L_2 载波和 P_1 、 P_2 码。利用此 4 类观测值自身的一些观测质量信息及其组合观测值,可以较好地解决周跳探测与修复等问题。Blewitt 对利用非差双频双 P 码 M-W 组合和 Geometry-Free 组合观测值探测和修复周跳的方法进行了较为细致的研究^[8],并且将此算法应用到 GIPSY 软件中。本文也采用类似的方法进行了非差相位观测数据周跳的探测与修复。此外,还辅助采用了电离层残差法进行周跳的探测,但由于低轨卫星运行速度快,相邻历元空间环境变化较大,此时电离层残差法探测周跳并不可靠。

1.3 PPP 定轨结果

基于上述方法,本文利用自行研制的软件,解算了 2002 年年积日 125 这一天的数据,得到了相应的 PPP 轨道。图 1 给出了卫星可视 GPS 卫星数和对应的几何精度因子(GDOP)。为便于轨道分析,将 PPP 轨道与 JPL 提供的精密轨道比较,得到的残差如图 2 所示。

比较图 1 和图 2 可知,几何定轨方法得到的轨道严重依赖于观测数据的质量。由于上述轨道是未进行滤波平滑的轨道,轨道误差体现了一定的随机性。如果认为 JPL 的轨道为真值,则该轨道径向精度为 $30 \sim 40$ cm,法向和切向均约为 2 cm。

2 动力轨道平滑

如果将几何 PPP 轨道作为具有一定观测误差的伪观测值,重新利用动力条件进行定轨,即可实现所谓的动力平滑过程。其观测方程和运动方程可描述为:

$$L_i = B(t_i, t_0)x_0 + \epsilon_i \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F(x, t) \\ x|_{t_0} &= x_0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, L_i 为 t_i 时刻的观测量; B 为一系数矩阵,其包含有求解式(5)得到的状态转移矩阵; x 为状态参数; ϵ 为观测噪声; $F(x, t)$ 为反映卫星受力信息的非线性泛函; x_0 为初始状态。

由于 GPS 观测量的连续性和高采样率,因而轨道平滑可以采用多种形式,如附加经验参数并频繁调节的动力平滑,通过增加随机过程滤波的简化动力平滑等。当然也可利用纯数学的多项式平滑,但其忽略了动力信息,效果不如前两者。

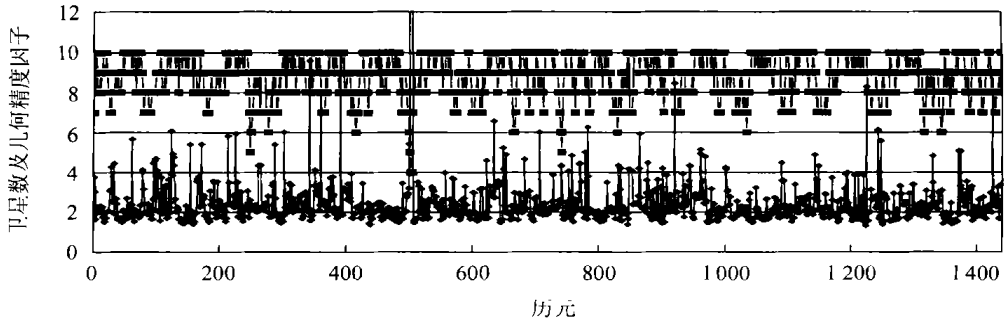


图 1 可视卫星数和相应的几何精度因子

Fig. 1 Number of Satellites and GDOP

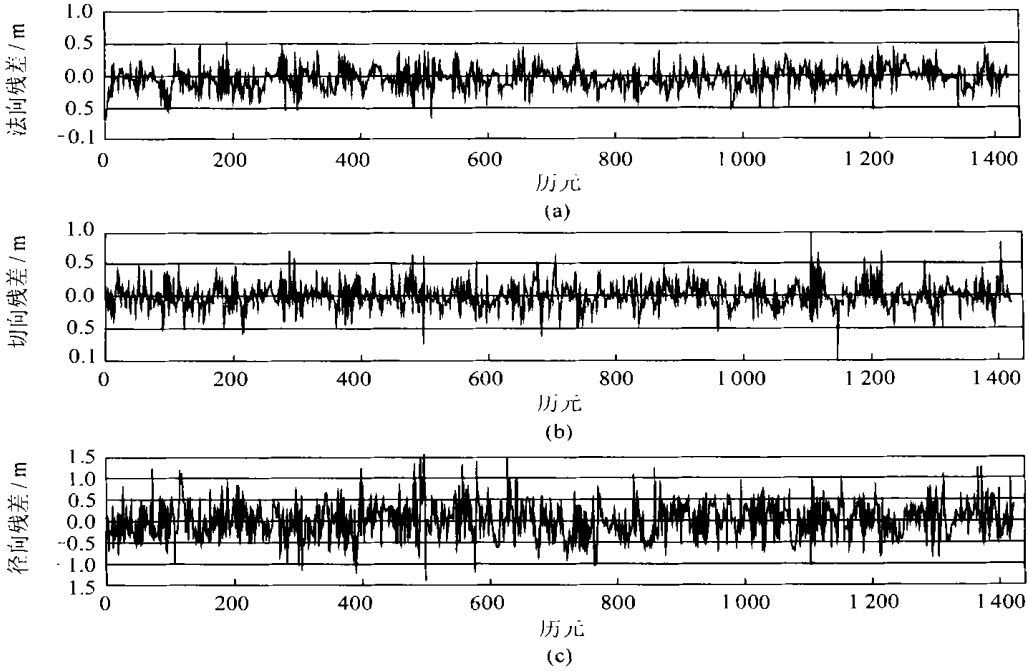


图 2 PPP 定轨结果与 JPL 精密轨道比较的残差

Fig. 2 Residuals Between Results of PPP and Precise Orbit of JPL

本文将上述 PPP 轨道分成 5 个 6h 的弧段分别进行平滑, 每两个相邻弧段有 1.5h 的重叠。平滑时所采用的主要动力模型如表 1 所示, 其中大气阻力模型公式如下:

$$P_{\text{drag}} = -\frac{1}{2} \rho C_d \frac{A}{m} v_r \bar{v}_r \quad (6)$$

式中, C_d 为大气阻力参数; \bar{v}_r 为卫星相对于大气的速度; v_r 为 \bar{v}_r 的量值; A 为卫星垂直于 \bar{v}_r 的横截面积; m 为卫星质量; ρ 为卫星处的大气密度。

经验动力模型可表示为:

表 1 动力模型及待估参数

Tab. 1 Dynamic Models and Estimated Parameters

模型	参数	备注
重力场	EGM96	不估计
第 N 个行星引力	JPL DE405	不估计
固体潮汐, 海洋潮汐	IERS96	不估计
太阳光压模型	基于对卫星表面积分的光压模型	每弧段(6h)估计 1 参数
大气阻力模型	式(6)和DTM96	每 1.5h 估计 1 参数 C_d
经验动力参数	式(7)	每圈估计 9 参数: $a_{r1}, a_{n1}, a_{n1}, b_{r1}, b_{l1}, b_{n1}, c_{r1}, c_{l1}, c_{n1}$; 每三圈估计 6 参数: $a_{r3}, a_{\Delta}, a_{n3}, b_{r3}, b_{l3}, b_{n3}$

$$P_{\text{emp}} = \begin{bmatrix} a_{r1} \cos u + b_{r1} \sin u + c_{r1} \\ a_{t1} \cos u + b_{t1} \sin u + c_{t1} \\ a_{n1} \cos u + b_{n1} \sin u + c_{n1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{r3} \cos(u/\beta) + b_{r3} \sin(u/\beta) \\ a_{t3} \cos(u/\beta) + b_{t3} \sin(u/\beta) \\ a_{n3} \cos(u/\beta) + b_{n3} \sin(u/\beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, u 为卫星纬度; 其他为待估参数。

依据上述动力模型平滑, 分别得到 5 个 6h 弧段的轨道。每两相邻轨道重叠部分互差的残差均方差在 2cm 左右。平滑后得到的轨道与 JPL 的轨道相比较可得相应残差, 在重叠部分取后一弧段的结果, 可显示如图 3。

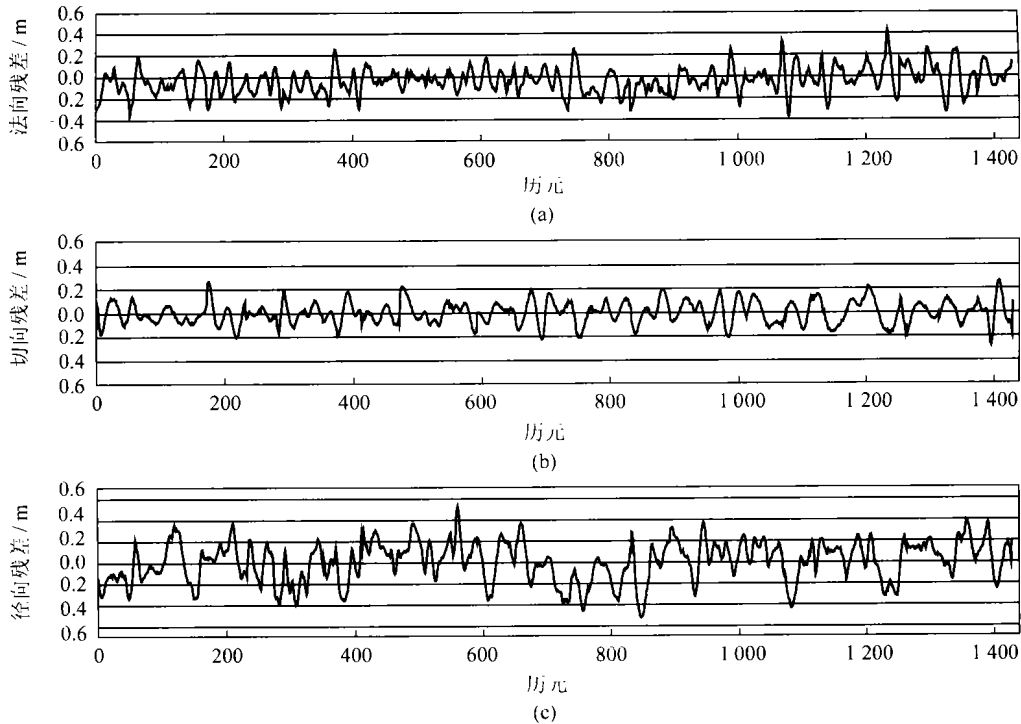


图 3 动力平滑后的轨道与 JPL 精密轨道比较的残差

Fig. 3 Residuals Between Results of Dynamic Smoothing and Precise Orbit of JPL

从图 3 可知, 平滑后的轨道有明显改善。这是因为虽然低轨卫星的动力模型有误差, 但模型误差引起的加速度控制在 $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以下并不困难, 相邻两历元因模型误差引起的位置误差最大也就 1cm 左右, 所以动力模型是一个非常有用的约束。

动力模型的误差在具体的区域是未知的, 但它只是一小量, 于是考虑在式(4)附加一非参数项来描述。由于动力平滑时观测量为轨道坐标, 因此, 用来描述轨道位置误差的非参数项可表示为与其他参数无关的时间变量 S_i , 得半参数观测方程为:

$$L_i = B(t_i, t_0)x_0 + \alpha S_i + \epsilon_i \quad (8)$$

则传统的最小二乘求解方程组

$$\begin{cases} V^T P V = \min \\ V = Bx - L \end{cases} \quad (9)$$

就可转化为:

$$\begin{cases} V^T P V + \alpha S^T R S = \min \\ V = Bx - L - \alpha S \end{cases} \quad (10)$$

式中, R 为 S 的物理描述, 与文献[9]中一致, 即

要求相邻历元互差越小越好; 同时因为其不满秩, 需增加均值为零的附加条件。 α 为一经验平滑参数, 该算例根据多次试算取为 30 较合适, 一般可根据以下公式给出:

$$\alpha \approx r_0 / r_p \quad (11)$$

式中, r_0 为观测误差的标准差; r_p 为模型误差在相邻历元间引起的位置误差的标准差。

基于上述动力模型, 在不估计光压参数, 同时不考虑每三圈的经验参数的情况下, 进行动力平滑得到的轨道与 JPL 的精密轨道的残差均方差在径向、切向和法向分别为 23cm、13cm 和 15cm。在增加非参数项后, 精度有明显改善, 上述残差均方差提高到 18cm、9cm 和 13cm, 该结果比多经验参数的动力平滑结果还要略好一些。取 3h 弧段来比较残差, 如图 4。

从图 4 可知, 加入半参数后的模型能更细致地反映观测值的信息, 尽管估计的参数更少一些, 得到的结果与多经验参数的动力模型平滑的结果基本一致, 具体轨道的比较如表 2。

表 2 给出了各种轨道之间的比较结果, 其中 JPL 和 GFZ 轨道互差的残差均方差在 8cm 左右, 说明其各自 5cm 的标称精度是可靠的。现考虑到 JPL 自身轨道的精度(假设为 5cm), 则可以得出本

文轨道的精度。基于表 2 的结果, 可以认为其中 PPP 轨道在径向、切向和法向的精度分别为 39cm、19cm 和 18cm, 而经过动力平滑后轨道的精度将分别优于 18cm、8cm 和 12cm。

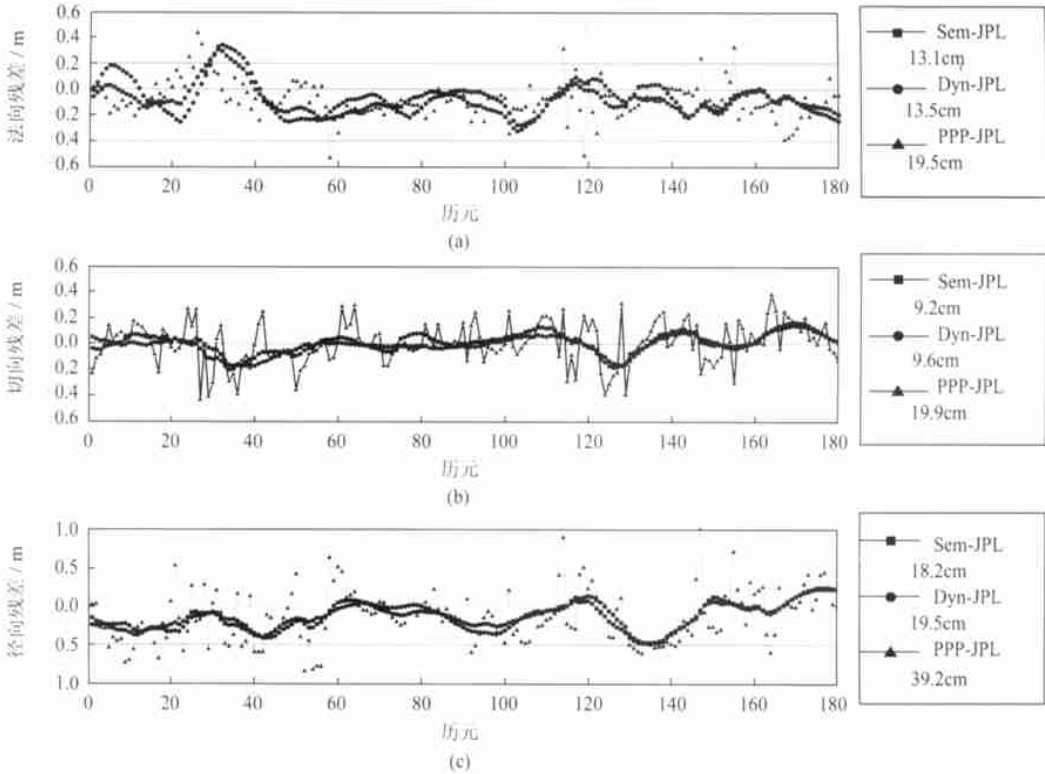


图 4 半参数动力平滑轨道(Sem)、经验参数动力平滑轨道(Dyn)、PPP 轨道与 JPL 轨道残差的相互比较

Fig. 4 Difference Between the Orbits Obtained by Semi-parameter Dynamic Smoothing, Empirical-Parameter Dynamic Smoothing, PPP Method and Precise Orbit Given by JPL

表 2 各种轨道的相互比较

Tab. 2 Difference Between Different Orbits

不同轨道的比较	残差标准差/cm			残差均方差/cm		
	径向	切向	法向	径向	切向	法向
PPP 轨道-JPL	37.4	18.1	17.4	39.2	19.9	19.5
动力轨道重叠互差	2.1	1.7	0.9	3.4	2.9	1.8
动力轨道-JPL	18.8	9.4	11.7	19.5	9.6	13.5
加非参数前轨道-JPL	22.4	12.7	13.7	23.3	13.1	15.4
半参数轨道-JPL	17.0	7.8	11.3	18.2	9.2	13.1
GFZ-JPL	6.1	7.3	8.5	7.7	9.1	10.2

从表 2 可以得出, 通过调节经验参数的动力法或者简化动力法所得到的轨道, 在径向的精度与其他两个方向的精度较为一致, 有时甚至更好。但基于 PPP 方法所定出的轨道, 径向精度明显不如切向和法向, 这是由于单点定位时垂直向精度较差引起的。

动力平滑能较大地提高纯几何 PPP 定轨的精度, 主要是利用动力信息能较好地平滑掉随机观测误差, 但动力模型也存在一定的模型误差, 因此, 适

当的模型补偿机制动力平滑必不可少。文中提出的附加非参数项的半参数模型能有效地吸收动力模型误差, 对提高动力轨道的精度有一定帮助。

3 结 语

1) 利用 IGS 发布的精密星历和钟差, 能快速地得到低轨卫星的纯几何 PPP 轨道, 目前文中的初步结果在径向的精度为 30~40cm, 切向和法向可以保持在 10~20cm。

2) 动力模型是卫星精密定轨非常有用的信息, 利用动力模型对纯几何轨道进行平滑能有效提高其精度, 经动力平滑后的轨道在径向、切向和法向可分别优于 18cm、8cm 和 12 cm。

3) 现有的动力模型已有较高精度, 短时间内的误差积累量值并不大, 可以通过各种动力模型进行补偿。通过频繁地调节经验动力参数和大气阻力参数, 能有效地吸收模型误差。

4) 文中基于半参数估计方法的动力平滑过程, 虽然非参数项物理描述很简单, 但是能有效地吸收模型误差, 并能较好地反映原有观测量的信息, 因而该方法值得深入研究。

参 考 文 献

- 1 Rim H J, Davis G W, Schutz B E. Dynamic Orbit Determination for the EOS Laser Altimeter Satellite (EOS ALT/GLAS) Using GPS Measurements. *J. Astron. Sci.*, 1996, 44(3): 409 ~ 424
- 2 Yunck T P, Bertiger W I, Wu S C, et al. First Assessment of GPS-based Reduced Dynamic Orbit Determination on TOPEX/Poseidon. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, 21(7): 541 ~ 544
- 3 Svehla D, Rothacher M. Kinematic Orbit Determination of LEOs Based on Zero or Double-Difference Algorithms Using Simulated and Real SST GPS Data. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, 2001
- 4 Kouba J, Heroux P. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. *GPS Solution*, 2001, 5(2): 12 ~ 28
- 5 Zhu S, Reigber C, Massmann F H, et al. Strengthening of Reference Frame Solutions by CHAMP and GRACE. IUGG Sapporo, Japan, 2003
- 6 Zumbeige 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(B3): 5 005 ~ 5 017
- 7 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现:[博士论文]. 武汉: 武汉大学, 2002
- 8 Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199 ~ 202
- 9 孙海燕, 吴云. 半参数回归和模型精化. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(2): 172 ~ 174

第一作者简介: 刘经南, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 现主要从事空间大地测量和地球动力学研究。代表成果: 国家高精度 GPS 数据处理方案; GPS 卫星定位数据处理综合软件; WADGPS 数据处理软件; 青藏高原地壳运动与变形的 GPS 研究等。

E-mail: jliu@whu.edu.cn

Geometric Orbit Determination of CHAMP Satellite and Dynamic Models' Compensation During Orbit Smoothing

LIU Jingnan¹ ZHAO Qile¹ ZHANG Xiaohong²

(1 Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper discusses the geometric PPP orbit determination of CHAMP satellite from onboard GPS data, analyzes the dynamic orbit smoothing based on the PPP, and presents a semi-parameter orbit smoothing method, which uses a non-parameter item to absorb dynamic error.

Key words: CHAMP; POD; PPP; dynamic orbit smoothing; semi-parameter method

About the first author: LIU Jingnan, professor, member of Chinese Academy of Engineering (CAE). His main research fields are satellite geodesy and geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme of high precision GPS data processing in China, the comprehensive software of GPS satellite positioning processing, the software of WADGPS data processing and the crustal movement and deformation of Qinghai-Tibet Plateau using GPS, etc.

E-mail: jliu@whu.edu.cn

(责任编辑: 涓涓)