

重力场恢复中的基于星载 GPS 的低轨卫星 简化动力学定轨方法研究

韩保民^{1,3}, 许厚泽²

(1. 山东理工大学建筑工程学院, 淄博 255049; 2. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 3. 西安测绘研究所, 西安 710054)

摘 要 低轨重力卫星轨道的精确确定是获得精密地球重力场模型的前提, 而精密重力场模型又是获得高精度定轨结果的保证. 本文简述了利用卫星重力方法恢复地球重力场及简化动力学方法确定低轨卫星轨道的数学模型, 并简单分析和比较现有的几种重力场模型. 用 CHAMP 实测数据, 结合现有的重力场模型, 系统分析、研究了不同阶次、不同重力场模型对低轨卫星定轨精度的影响; 研究了不同间隔的随机速度脉冲在简化动力学方法中对模型误差的吸收、调节作用. 计算结果表明, 在定轨中, 选择合理阶次的、较精确的重力场模型及合理间隔的随机脉冲参数, 不但可以提高计算效率, 更能提高定轨精度.

关键词 重力场恢复, 低轨卫星定轨, 简化动力学方法, 重力场模型, 随机脉冲

中图分类号 P631 文献标识码 A 文章编号 1004-2903(2007)01-0073-07

GPS-based reduced-dynamic orbit determination for gravity field recovery

HAN Bao-min^{1,3}, XU Hou-ze²

(1. School of Architecture and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;
2. Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,
Wuhan 430077, China; 3. Xi'an Research Institute of Surveying & Mapping, Xi'an 710054, China)

Abstract Precise satellite orbit determination is a first prerequisite for gravity field recovery and measuring its variations in time. On the other hand, the precision gravity model is important guarantees for obtaining high precision orbiting results using the dynamic or reduced-dynamic orbit determination method. The paper briefly discussed the mathematical model of gravity recovery based on the energy conservation law and model of reduced-dynamic orbit determination, than analyzed and compared existing gravity models. At last, the impacts of different order and different gravity models on the orbit determination accuracy were systematically studied and compared with the real GPS observations from onboard receiver on CHAMP satellite, and the impacts of different predefined interval pseudo-stochastic velocity pulses on absorbing and adjusting the un-modeled dynamic force errors were also analyzed. The results show that the selection of proper order, right gravity model and appropriate predefined interval pseudo-stochastic pulses can not only boost the computational efficiency but also greatly improve the accuracy of orbit determination.

Keywords gravity recovery, orbit determination of low-earth-orbiters, reduced-dynamic method, gravity model, stochastic pulse

0 引 言

重力场是反映地球介质密度变化和各种环境下

动力学特征的最基本和最直接的物理量. 随着对地球物理模型、冰后回弹、海洋洋流和海面地形以及统一全球高程基准等基础科学的深入研究, 利用重力

收稿日期 2006-09-19; 修回日期 2006-12-30.

基金项目 国家自然科学基金项目(40474001, 40204001)、山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室开放基金项目(SD040209)和山东理工大学科研基金项目(2004KJM11)联合资助.

作者简介 韩保民, 男, 1969 年生, 博士后, 副教授. 从事 GPS 定位、星载 GPS 低轨卫星精密定轨等方面研究.
(E-mail: hanbm@sdut.edu.cn)

场手段研究相关问题显得越来越重要^[1]. 近几十年来, 由于空间定位技术特别是 GPS 的应用, 地球重力场的研究取得了突破性的进展, 不仅采集了过去难于想象的、覆盖全球重力场数据, 而且精度也有显著提高^[2]. 为提高重力场模型的精度并确定其随时间变化量, 欧洲和美国将相继发射三颗低轨重力卫星 CHAMP、GRACE 和 GOCE^[3]. 在应用低轨卫星研究重力场时, 地球重力场是决定地球低轨卫星轨道的最主要的力场, 低轨卫星的精密定轨需要精密的重力场模型; 同时重力场的精确恢复又依赖于高精度的低轨卫星轨道^[3]. 因此要想获得高精度重力场模型, 必须仔细研究低轨重力卫星精密定轨方法.

传统的低轨卫星定轨大多采用动力学方法, 其特点是能够提供连续的低轨卫星位置, 并可以进行轨道预报. 由于位于 300~700 km 高度的低轨卫星, 受地球重力影响很大, 但却没有合适重力场模型来精确描述低轨卫星所受重力影响, 限制了低轨卫星定轨精度的提高. 随着 GPS 技术的开发和利用, 采用星载 GPS 的几何法定轨已成为低轨卫星精密定轨中最有效的方法之一. 这种方法利用星载 GPS 接收机可对低轨卫星实现全天候、连续观测, 不受力的模型精度影响, 其定轨精度不随卫星轨道高度变化而变化, 但却易受观测到的 GPS 观测质量及卫星几何图形结构的制约, 而观测质量及图形结构又是经常变化的, 导致几何法定轨精度会出现波动^[4]. 为了解决动力学定轨中动力学模型误差及几何法定轨中存在的问题, Yunck 等科学家提出了将动力学法与几何法联合起来的简化动力学定轨法^[5~7]. 该方法充分吸收了 GPS 几何法定轨和动力学法定轨的优点, 用卡尔曼滤波形式, 同时顾及低轨卫星的动力学状态信息以及 GPS 几何法提供的位置信息, 通过适当调整这两类信息的权, 利用过程噪声或随机速度脉冲来吸收没有精确模型化的力的影响, 达到改善定轨精度的目的^[5~7]. 但如果力学模型与真实受力情况相差太大的话, 这种调节也是有限度的, 也不可能得到精密轨道. 换言之, 简化动力学定轨精度也受低轨卫星上的力学模型精度限制. 为了得到高精度定轨结果, 本文重点研究了基于星载 GPS 双频非差观测值的低轨卫星简化动力学定轨方法. 文章在首先总结了利用能量守恒定律恢复重力场的原理及低轨卫星定轨模型后, 重点研究了不同阶的不同重力场模型对定轨结果的影响, 并分析了随机速度脉冲经验参数的设置对力学模型误差的调节作用, 以期找出最合理阶数的合理重力场模型及合理随机脉

冲参数设置, 以获得高精度的定轨结果, 从而获得高精度的重力场模型.

2 基于低轨卫星星历的重力场恢复模型

基于低轨卫星几何轨道及其协方差信息计算重力场模型是一种较为简便快捷的方法, 它可以有效避免将低轨卫星位置同重力场系数一起解算时出现大量的待估参数. 根据能量守恒定律, 在低轨卫星运动过程中, 如果没有非保守力和地球自转等的影响, 卫星的动能与势能之和为一常量, 即总能量保持不变, 其方程为^[8]:

$$E_0 = \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \mathbf{V}, \quad (1)$$

其中, E_0 为低轨卫星总的能量, \mathbf{V} 为与各天体间的万有引力产生的引力势能(其符号与地球重力场研究中的引力位相反), $\frac{1}{2} \mathbf{v}^2$ 为动能,

$$\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T$$

为速度矢量,

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt},$$

$$\mathbf{x} = (x, y, z)^T$$

为位置矢量.

考虑到地球自转引起的位旋转效应和由于受大气阻力、太阳光压等影响而造成的卫星能量的损失(转化为热能等其他形式的能), 卫星的动能与势能之和不为常数, 此时能量守恒方程应写为

$$T = \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 - \omega(xv_y - yv_x) \mathbf{V}_{\text{sun}} - \mathbf{V}_{\text{moon}} - \mathbf{V}_0 - \mathbf{E}_0 - \mathbf{F}, \quad (2)$$

式中, ω 为地球自转角速度, \mathbf{V}_{sun} 和 \mathbf{V}_{moon} 分别为太阳和月球产生的引力位, \mathbf{F} 为由非保守力引起的能量损失或耗散, \mathbf{V}_0 为地球重力场正常位(不包括离心力位), 通常取 GRS80 正常重力位. 由此得到的 T 为低轨卫星所在高度处的地球重力场扰动位. 知道扰动位后, 根据扰动位与重力位系数间的关系, 便可利用时域法或空域法确定重力场位系数.

3 简化动力法定轨的数学模型

3.1 基于 PPP 技术的几何法定轨数学模型

基于 PPP(Precise Point Positioning) 方法的几何法定轨是用双频消电离层组合观测值^[9] 计算低轨卫星的粗略位置, 用历元间差分的相位消电离层组合观测值计算历元间低轨卫星精密位置差, 然后用一定的数学方法, 利用已知的低轨卫星的粗略位置

和精确位置差求出各历元低轨卫星的精确位置。

线性化后的第 i 个历元和第 $i-1$ 个历元的双频 P(Precision) 码消电离层组合的观测方程及这两个历元间的相位消电离层组合的单差观测方程为^[7]。

$$\mathbf{A}_{i-1}x_{i-1} = \tilde{p}_{i-1}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_i x_i = \tilde{p}_i, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_i x_i - \mathbf{A}_{i-1} x_{i-1} = \tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_{i-1}, (i = 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{A}_i, \mathbf{A}_{i-1}$ 为第 i 和 $i-1$ 历元设计矩阵, $x_i = (x_i, y_i, z_i, \delta_i)^\top$ 为低轨卫星三维位置及接收机钟差向量; \tilde{p}_i 为双频 P 码的消电离层组合的观测值减计算值所得向量, $\tilde{\phi}_i, \tilde{\phi}_{i-1}$ 为第 i 和 $i-1$ 历元双频相位消电离层组合的观测值减计算值所得向量。

记:

$$\delta \mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i - \mathbf{A}_{i-1},$$

则(5)式可写成

$$\mathbf{A}_i(x_i - x_{i-1}) + \delta \mathbf{A}_i x_{i-1} = \tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_{i-1}, \quad (6)$$

忽略微小量 $\delta \mathbf{A}_i x_{i-1}$ (对于以 7 km/s 速度运行的低轨卫星来说, 假设低轨卫星的坐标估值精度为 1 m, 对于 10~30 s 间隔的两历元间的位置差造成的影响约为 1 cm), 上式可写为

$$\mathbf{A}_i x_i - \mathbf{A}_i x_{i-1} \approx \tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_{i-1}, \quad (7)$$

将式(3)、(4)和式(7)联合解算

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{i-1} x_{i-1} = \tilde{p}_{i-1} \\ \mathbf{A}_i x_i = \tilde{p}_i \\ \mathbf{A}_i x_i - \mathbf{A}_i x_{i-1} = \tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_{i-1} \end{cases}, \quad (8)$$

其权为

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \sigma_p^2 \mathbf{I} & & \\ & \sigma_p^2 \mathbf{I} & \\ & & 2\sigma_p^2 \mathbf{I} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sigma_p^2} \begin{pmatrix} \mathbf{I} & & \\ & \mathbf{I} & \\ & & \frac{1}{2\alpha} \mathbf{I} \end{pmatrix},$$

$$\alpha = \frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_p^2}.$$

解得

$$\begin{cases} \hat{x} = \left[(1 + (2\alpha)\mathbf{A}_{i-1}^\top \mathbf{A}_{i-1} + \mathbf{A}_i^\top \mathbf{A}_i) \right]^{-1} \\ \quad \times \left[(1 + 2\alpha)\mathbf{A}_{i-1}^\top \tilde{p}_{i-1} + \mathbf{A}_i (\tilde{p}_i - \tilde{\phi}_{i-1} + \tilde{\phi}_i) \right], \\ \hat{x}_i = \frac{1}{1 + 2\alpha} \hat{x}_{i-1} + (\mathbf{A}_i^\top \mathbf{A}_i)^{-1} \\ \quad \times \left[\frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \tilde{p}_i + \frac{1}{1 + 2\alpha} (-\tilde{\phi}_{i-1} + \tilde{\phi}_i) \right]. \end{cases} \quad (9)$$

3.2 动力学定轨

低轨卫星在绕地球运动过程中会受到多种作用力的影响. 总的说来可将这些作用力分为保守力和非保守力两类. 在惯性坐标系中, 根据牛顿第二定律可得低轨卫星的运动方程^[10]

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_{ng}, \quad (10)$$

其中, $\ddot{\mathbf{r}}$ 为卫星在惯性坐标系中的位置矢量, $\mathbf{f}_g, \mathbf{f}_{ng}$ 分别为保守力和非保守力引起的加速度的总和。

要想得到(10)式准确解析解是十分困难的, 但我们可以用一定的数值积分的方法得出上式的近似的数值解. 速度矢量 $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}}$, 设除了 \mathbf{v}, \mathbf{r} 外, 其他需要求解的常数参数为 \mathbf{c} , 令

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{c} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{f} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

则卫星运动方程及其初始条件可写为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}, \quad (12)$$

$$\mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0. \quad (13)$$

3.3 简化的动力学定轨

这种方法实质上是利用几何法求出的低轨卫星的粗略的位置和历元间相对位置差作为伪观测值, 然后动力学方法对其进行平滑, 进而给出连续的轨道精确值. 这种方法的关键在于每隔一定时间在径向、法向和切向各预置一个有先验方差定义的伪随机速度脉冲(或过程噪声), 来吸收模型误差的影响. 速度脉冲变化的大小由下列伪观测方程定义^[11]:

$$\delta v = 0, \quad (14)$$

其权为:

$$\omega = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2(\delta v)}.$$

因此标量速度的变化被定义为具有期望为 0、方差为 $\sigma^2(\delta v)$ 的随机变量, σ_0 为平差单位权的平均误差。

如果 $\sigma(\delta v)$ 很大, 权 ω 就很小, 这样可以使得 δv 吸收较大的力的模型误差. 相反, 如果 $\sigma(\delta v)$ 很小, 权 ω 就很大, 这时说明力的模型较准, 仅允许有微弱的速度变化. 速度允许变化的范围大约在 $\pm 3\sigma(\delta v)$ 之间。

3.4 定轨所用重力场模型

低轨卫星一般运行大约在 300 km~700 km 左右的轨道高度, 因此在低轨卫星所受力学模型中, 地球重力场的高阶部分对其影响很大。

定轨中用到重力场模型的最大级数和阶数由所要确定的卫星高度而定. 对于像 GPS 这样的高轨卫星, 重力场的球谐函数展开到 8 阶就足够了. 然而对

于高度在几百公里左右的低轨卫星来说,8阶的重力场远远不能满足精密定轨的需求,需将重力场模型展开到70阶甚至更多^[7].即使这样,大多数重力场模型还是不能满足定轨精度要求,因此在简化动力学定轨中,除了要仔细研究随机速度脉冲的设置外,还要重点研究展开到不同阶、不同级的重力场模型对定轨精度的影响,以寻找合理阶数的合理重力场模型和合理间隔的随机速度脉冲设置,以求的最佳定轨结果,关于重力场模型的描述和GPS方法应用参见文献[12~22].

4 算例分析

为了验证重力场模型及随机脉冲的设置对定轨精度的影响,我们采用GFZ数据中心提供的2004年2月5日CHAMP卫星星载GPS双频非差观测值进行计算.定轨时采用简化的动力学定轨方法,采用COD分析中心提供的精密星历、地球自转参数及30秒采样间隔的精密卫星钟差.采用GPS双频伪距消电离层组合的非差观测值和消电离层组合的历元间差分的相位观测值作为基本观测值,并施加GPS卫星和星载GPS接收机天线相位中心改正、地球自转改正及相对论改正等模型.将采用几何法解算出的每历元CHAMP的粗略位置及精确位置差作为伪观测值,然后用动力学进行平滑.在动力学平滑中采用的主要力的模型和待估参数见表1.

表1 CHAMP卫星简化动力学定轨中
主要力学模型及待估参数

Table 1 The main force models and parameters to be estimated in reduced-dynamic orbit determination of CHAMP satellite

力模型及待估参数	具体内容
重力场模型	1. GEMT3, 2. JGM3, 3. EGM96, 4. Eigen2cp
固体潮和海潮	CSR3.0
太阳、月亮摄动	JPL DE200
6个初始条件	$a, e, i, \omega, \Omega, M$
9个经验力学模型	3个常数和6个 once-per-resolve 参数
随机速度脉冲	每12分钟一组伪随机速度脉冲参数(沿径向、切向和法向) 速度标准差 $\sigma_0 = 10 \text{ mm/s}$

计算了4种重力场模型分别展开到10阶、30阶、50阶、70阶、100阶及120阶时的CHAMP轨

道.德国慕尼黑工业大学的几何法定轨结果被公认为CHAMP定轨精度最高的结果之一,我们将其作为“真值”,将我们的定轨结果与“真值”比较,比较结果见表2和图1.从图1和表2中,我们可以看出,利用包括CHAMP跟踪数据的100阶的重力场Eigen2cp的定轨结果最好,这个结果正说明了用重力卫星恢复重力场的精度有了较大改进,而其他不包括CHAMP数据的重力场模型的定轨结果较差.在30阶以前,无论使用那种重力场模型,都不能得到令人满意的定轨结果,要想得到较高精度的定轨结果,必须将重力场模型展开到100阶甚至更高.需要说明的是,由于GEMT3和JGM3模型的最高阶数分别只能展开到50阶和70阶,所以这之后的定轨结果不变.虽然EGM96最高能展开到360阶,但实际上从70阶以后定轨精度趋于稳定.而Eigen2cp模型在展开到100阶后,定轨结果也无法再提高.

为了考察随机速度脉冲在不同重力场中的调节作用,我们还计算了50阶时4种重力场在径向、切向和法向的随机速度脉冲,结果见表3和图2、3、4.随机速度脉冲大小反映了没有模型化的力的大小,也即力学模型的精度.脉冲的值越大,说明没有模型化的力越大,也即力学模型越不准确.表3和图2~4的结果较好的验证了这一点.从上面的定轨结果知道,GEMT3模型较差,而Eigen2cp模型较准确,反映在随机速度脉冲上,也是GEMT3的脉冲较大,而Eigen2cp的则较小.根据GEMT3估计的脉冲的绝对值的平均值几乎比用Eigen2cp计算的值高一个数量级.另外我们还可以看出,无论那种重力场模型,在切方向的随机脉冲较小,而径向的随机脉冲较大.

另外我们还计算了50阶时4种重力场,在不同采样间隔设置随机速度脉冲时对定轨结果的影响.其结果见表4.从表4我们可以看出,对于力学模型不准确的情况,如50阶的GEMT3,随机速度脉冲的调节作用还是十分明显的.随机脉冲设置的时间间隔越小,则其调节作用越明显,定轨结果越好.而对于重力场模型较精确的100阶的Eigen2cp模型来说,随机脉冲的调节作用虽然不能忽视,但对采样间隔要求没有像GEMT3那样密,因为在间隔6—90分钟范围内变化时,对定轨精度的改进没有明显变化.虽然我们可以不管任何时候,都将随机速度脉冲设置的很密,但那就意味着需要估计更多的参数,需要更多的计算时间和更低的效率.

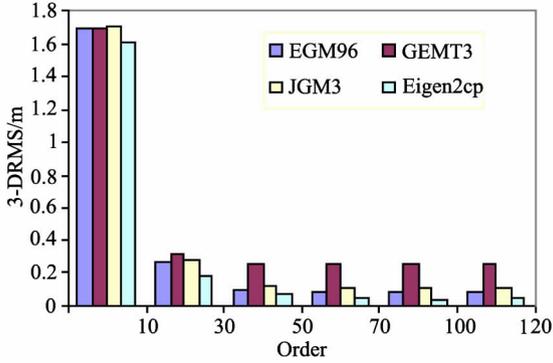


图 1 不同阶数的不同重力场定轨结果与 TUM 解比较的 RMS 误差(m)

Fig. 1 RMS errors between TUM solutions and our orbiting results with different order and different gravity models

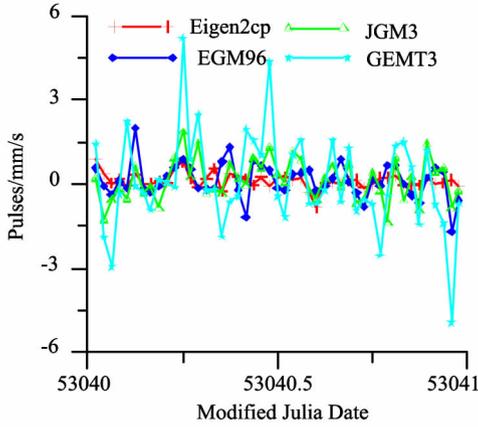


图 2 用 50 阶不同重力场定轨时估计的径向速度脉冲
Fig. 2 Stochastic Pulses at Radial directions with 50 order gravity models

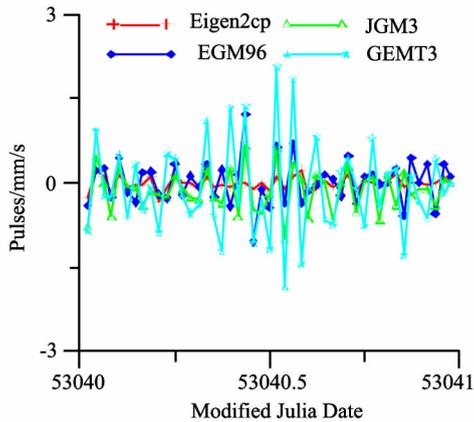


图 3 用 50 阶不同重力场定轨时估计的切向速度脉冲
Fig. 3 Stochastic Pulses at alongtrack direction with 50 order gravity models

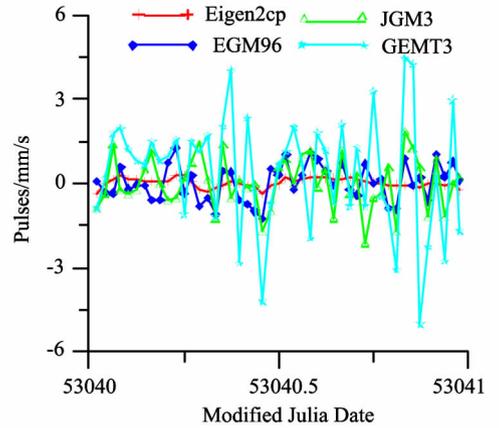


图 4 用 50 阶不同重力场定轨时估计的法向速度脉冲
Fig. 4 Stochastic Pulses at cross-track direction with 50 order gravity models

表 2 不同阶数的不同重力场定轨结果与 TUM 解比较的 RMS 误差 (m)

Table 2 RMS errors between TUM solutions and our orbiting results with different order and different gravity models

Gravity model	Order	RMS x (m)	RMS y (m)	RMS z (m)	3-D RMS (m)
EGM96	10	1.1824	2.5243	0.9645	1.7030
	30	0.2136	0.3762	0.2101	0.2777
	50	0.0741	0.1179	0.0980	0.0983
	70	0.0636	0.1072	0.0949	0.0904
	100	0.0619	0.1094	0.0941	0.0907
	120	0.0620	0.1091	0.0941	0.0906
GEMT3	10	1.1784	2.5271	0.9623	1.7030
	30	0.2184	0.4341	0.2617	0.3186
	50	0.1630	0.3105	0.2492	0.2484
	70	0.1630	0.3105	0.2492	0.2484
	100	0.1630	0.3105	0.2492	0.2484
	120	0.1630	0.3105	0.2492	0.2484
JGM3	10	1.1830	2.5274	0.9639	1.7045
	30	0.2105	0.3925	0.1961	0.2810
	50	0.0892	0.1730	0.1056	0.1279
	70	0.0815	0.1555	0.1039	0.1178
	100	0.0815	0.1555	0.1039	0.1178
	120	0.0815	0.1555	0.1039	0.1178
Eigen2cp	10	1.1831	2.5255	0.9653	1.5028
	30	0.2078	0.3566	0.1920	0.1828
	50	0.0672	0.0782	0.0581	0.0703
	70	0.0440	0.0399	0.0506	0.0551
	100	0.0398	0.0270	0.0479	0.0450
	120	0.0401	0.0279	0.0507	0.0457

表3 用50阶的不同重力场模型估计的RSW三个方向的随机脉冲绝对值大小的统计结果

Table 3 The statistic results of absolute stochastic pulses at three directions with 50 order different gravity models

Statistic Items	GEMT3 (mm/s)			JGM3 (mm/s)			EGM96 (mm/s)			Eigen2cp (mm/s)R		
	R	S	W	R	S	W	R	S	W	R	S	W
Max	5.19	2.06	4.99	1.87	1.01	2.12	1.97	1.22	1.27	0.78	0.30	0.33
Min	0.06	0.01	0.17	7E-3	9E-4	4E-2	0.014	7E-3	7E-3	1E-3	8E-4	6E-3
Median	0.96	0.51	1.46	0.53	0.25	0.56	0.39	0.24	0.49	0.12	0.07	0.08
Mean	1.26	0.66	1.74	0.60	0.30	0.74	0.47	0.30	0.53	0.18	0.07	0.09
Std	1.17	0.50	1.19	0.44	0.23	0.55	0.42	0.24	0.34	0.19	0.07	0.08

注:R: Radial, S: Along-track, W: Cross-track.

表4 随机速度脉冲取不同间隔时定轨结果与TUM解比较的RMS误差(m)

Table 4 RMS errors between TUM solutions and orbiting results with different pulse intervals (m)

Gravity model	6	12	18	24	36	60	90	180	No Pulse
50 order GEMT3	0.14	0.15	0.18	0.23	0.46	0.84	2.34	5.3	6.39
50 order Eigen2cp	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.17	0.29	0.51	1.90
100 order Eigen2cp	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.10	0.21	1.62

注, No Pulse 表示纯动力学解, 没有设置随机脉冲, 随机脉冲的间隔单位为分钟.

5 结论

计算结果表明, 不同阶的不同重力场模型对定轨结果影响是不一样的. 利用根据重力卫星精化的重力场模型 Eigen2cp 得到的定轨结果较令人满意, 而其他不包含 CHAMP 跟踪数据的重力场的定轨结果就相对较差. 实际上, 对于像 CHAMP 这样轨道高度在 400 km 左右的低轨卫星来说, 利用不包括 CHAMP(或 GRACE 卫星)重力卫星的跟踪数据的重力场, 是不可能得到高精度的定轨结果的. 合理间隔的分段随机速度脉冲的设置, 可以比较有效的吸收没有模型化的力的影响. 但对于 GEMT3 等精度较低, 展开阶数较少的重力场模型来说, 纯粹利用脉冲来吸收模型误差的影响是有一定限度的. 即使我们设置再密的随机脉冲也不可能得到令人满意的定轨结果. 因此我们必须利用已发射的和即将发射的重力卫星, 深入精化现有的重力场模型, 以得到更高精度的定轨结果.

参考文献 (References):

[1] 孙和平. 重力场的时间变化与地球动力学[J]. 中国科学院院刊, 2004, 19(3): 189~193.

[2] 沈云中. 应用 CHAMP 卫星星历精化地球重力场模型的研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2000.

[3] 陈俊勇. 现代低轨卫星对地球重力场探测的实践和进展[J]. 测绘科学, 2002, 27(1): 8~10.

[4] 韩保民. 基于星载 GPS 的低轨卫星几何法定轨理论研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2003.

[5] Yunck T P, S C Wu, W I Bertiger, *et al.* First assessment of

GPS-based reduced dynamic orbiter determination on TOPEX/POSEIDON[J]. *Geophys. Res. Letter*, 1994, 21(7): 541~544.

[6] Svehla D, Rothacher M. Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of low earth orbiters[J]. *Advances in Geosciences*, 2002, 1: 47~56.

[7] Bock H. Efficient methods for determining precise orbits of low earth orbiters using the Global Positioning System[D]. Berne, Switzerland: Astronomical Institute of University of Berne, 2003.

[8] 徐天河, 杨元喜. 利用 CHAMP 卫星几何法轨道恢复地球重力场模型[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 288~293.

[9] 袁运斌, 欧吉坤. 建立 GPS 格网电离层模型的站际分区法[J]. *科学通报*, 2002, 47(8): 636~639.

[10] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.

[11] Beutler G E, Brockmann W, Gurtner, *et al.* Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results[J]. *Manuscr. Geod.*, 1994, 19: 367~386.

[12] Lerch F J, Nerem R S, Putney B H, *et al.* A geopotential model from satellite tracking, Altimeter and surface gravity data: GEMT3[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99(B2): 2815~2839.

[13] Tapely B D, Watkins M M, Ries J C, *et al.*, The joint gravity model-3[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(B12), 28029~28049.

[14] Lemoine F G, HBaystertm K, Neumayer H, *et al.* The development of the joint NASA GSFC and the NIMA geopotential model EGM96, NASA/TP-1998-206861, National Aeronautics and Space Administration, 1998.

[15] Tapely B D, Chambers D, Cheng M, *et al.*, The TEG-4 gravity field model[A]. 25th General Assembly, EGS, Nice, France, April 2000.

[16] 许厚泽. 重力测量技术及重力学研究进展—廿三届 IUGG 大

- 会评述[J]. 地理空间信息, 2003, 10(3): 3~4.
- [17] 李斐, 岳建利, 张利明. 应用 GPS 重力数据确定(似)大地水准面[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 294~298.
- [18] 徐继生, 邹玉华, 马淑英. GPS 地面台网和掩星观测结合的时变三维电离层层析[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 759~767.
- [19] 胡雄, 曾桢, 张训械, 张冬娅, 肖存英. 大气 GPS 掩星观测反演方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 768~774.
- [20] 胡雄, 张训械, 吴小成, 肖存英, 曾桢, 宫晓艳. 山基 GPS 掩星观测实验及其反演原理[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 22~27.
- [21] 孙付平, 朱新慧, 王刃, 李建涛. 用 GPS 和 VLBI 数据检测固体地球的体积和形状变化[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1015~1021.
- [22] 吴小成, 胡雄, 张训械, Jens Wickert. 电离层 GPS 掩星观测改正 TEC 反演方法[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 328~334.

《地球物理学进展》2007 年征订启事

各期刊订户:

2007 年《地球物理学进展》由季刊改为双月刊, 每年 6 期, 每期定价不变, 仍为 35 元, 全年定价变为: 210 元。特此通知。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-62007709, 010-62007696

联系人 刘少华, 汪海英, 肖台琴

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, wanghy@mail.igcas.ac.cn

开户行 中国农业银行北京建德支行 账号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上: 购《地球物理学进展》款, 同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378, 022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn