

基于星载 GPS 非差数据的 COSMIC 卫星 几何定轨研究^{*}

郭金运^{1,2,*} 黄金维³ 曾子榜³ 常晓涛⁴ 韩延本¹

1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 山东科技大学 地球信息科学与工程学院, 青岛 266510;
3. 国立交通大学 土木工程学系, 新竹 300; 4. 中国测绘科学研究院, 北京 100039

摘要 COSMIC 的大地测量任务重点在于解算地球重力场模型以及低阶重力场时变规律研究, 这需要卫星精密几何轨道. 文中根据 CODE 的 GPS 卫星精密星历和时钟, COSMIC 卫星设计轨道和定轨 GPS 天线设计, 模拟了 COSMIC 星载 GPS 观测量. 利用运动学原理, 研究了基于星载 GPS 非差数据的 COSMIC 几何定轨能力. COSMIC 具有两个定轨天线 (POD + X 和 -X), 单独利用一个天线观测的几何定轨结果精度基本一致, 都大于模拟时给定的随机误差. 这主要是由卫星设计的 POD 天线位置造成的, 两个天线的视准向量与天顶方向之间的夹角不同, 同时 POD + X 位于卫星飞行方向, 而 POD - X 背向卫星飞行方向. 为了改善几何定轨精度, 利用 POD + X 和 -X 天线构成一个虚拟天线, 将两个 POD 天线的观测归算到虚拟天线. 利用虚拟天线的观测, 进行精密几何定轨, 通过与参考轨道的比较, 定轨精度与给定的模拟随机误差基本一致.

关键词 COSMIC 虚拟天线 GPS 非差数据 精密几何定轨

COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 是台湾 NSPO (National Space Organization) 和美国 UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) 合作的用以建立全球大气即时观测的卫星任务. COSMIC 是一个由 6 颗微卫星构成的星座, 分布于 6 个轨道面, 轨道倾角为 72° , 近圆形轨道 ($i=0.001^\circ$), 轨道间赤经夹角为 24° , 轨道高度为 700—800 km, 每颗卫星重约 62 kg. 在全球尺度内, COSMIC 采集了大量的高低 SST (satellite-to-satellite tracking) 观测量. COSMIC 星载 GPS 观测量多, 混叠误差少, 对地球重力场模型的贡献可达 50 阶次, 重力场时变可达 7 阶^[1, 2].

COSMIC 每颗卫星上安装有 BlackJack 星载 GPS 双频 POD (Precise Orbit Determination) 接收机, POD 天线有两个, 分别称为 POD + X 和 POD - X 天线, 共一个接收机, 用于精密定轨, 进行大地测量研究, 解算地球重力场模型, 研究重力场的时变规律^[3].

卫星定轨涉及卫星任务的顺利执行. 现在常用的定轨方法有动力学, 简化动力学和运动学定轨^[4-6]. 动力学方法能够给出连续的卫星轨道, 适用于卫星跟踪观测量较少, 分布不均匀和不连续的情况. 但是动力学方法需要复杂的卫星动力学模型, 需要进行大量力模型参数的解算和数值积分计算, 包括初始历元的位置、速度、大气参数、太阳辐射压参数等. 根据最

2007-05-15 收稿, 2007-07-10 收修改稿

* 国家自然科学基金 (批准号: 40774009)、国家“八六三”计划 (批准号: 2006AA12z303)、中国国际科技合作计划 (批准号: 2006DFA21980) 和山东省自然科学基金 (批准号: Y2003E01) 资助

** E-mail: jinyunguo1@126.com, guojy@geodesy.cv.nctu.edu.tw

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

小二乘法, 使得解算轨道最佳拟合观测值^[7, 8]. 简化动力学方法是利用已知卫星受力模型, 解算较少的力模型参数, 特别是较少的非保守摄动参数, 如经验加速度参数、随机脉冲参数等, 利用大量、连续的卫星跟踪观测, 进行精密定轨. 几何法定轨是基于连续、大量的卫星跟踪观测, 根据观测量和卫星轨道之间的几何关系, 进行未知参数估计, 不需要卫星动力模型及解算力模型参数. 但几何定轨给出的轨道在有些历元会存在不连续现象, 主要是由于观测数据少或者缺失, 观测数据质量较差, 卫星几何构形不合理等原因. 在简化动力学定轨中, 解算少量的动力参数等价于最优优化时间间隔 τ 和动力参数的先验标准差 σ_a , 它们反映了先验卫星动力模型的质量^[9, 10]. 因此, 简化动力学定轨就是动力模型先验知识和卫星跟踪观测的几何信息之间的平衡. 实际上, 动力学定轨可以看做是简化动力定轨的极限形式, 即 $\tau = \infty$ 和 $\sigma_a = 0$. 几何定轨不需要先验动力模型, 也可以看做是简化动力定轨的另一极限形式, 即 $\tau = 0$ 和 $\sigma_a = \infty$.

GPS 技术为低轨卫星的全天候、连续跟踪提供了可能. TOPEX/Poseidon 卫星上装载了星载 GPS 接收机 GPSDR, 进行 GPS 定轨试验. 采用动力学和简化动力学方法进行定轨, 径向定轨精度优于 $4 \text{ cm}^{[11]}$. 随后的多颗低轨卫星都安装了星载 GPS 接收机, 如 MicroLab-1, GFO, SUNSAT, PRSTED, CHAMP, SAC-C, Jason-1, GRACE, ICESat 等^[12]. 为了掌握星载 GPS 的数据处理和定轨能力, 2002 年 5 月, IGS (International GNSS Service) 组织实施了 LEO POD Pilot Project (IGSLEO PP), 基于卫星轨道动力学, 进行了利用星载 GPS 的低轨卫星精密定轨、轨道评估、轨道整合、星载 GPS 数据分析等研究, 认为基于 GPS 的 CHAMP 综合定轨精度达到了 0.1 m 量级^[13].

对于探测地球重力场的低轨卫星 (如 CHAMP, GRACE, GOCE 等) 来说, 如果没有精密轨道, 其任务是不可能完成的. 它们的轨道高度只有 $200\text{--}500 \text{ km}$, 需要 GPS 卫星高质量的连续跟踪, 以获得亚分米, 甚至厘米量级的定轨精度^[14]. 对于 COSMIC 的大地测量任务, 重点是解算重力场模型及其时变. 因为几何轨道不直接包含地球重力场模型及其他动力学模型信息, 在理论上是恢复重力场的最佳选择. 因此用两步法解算地球重力场需要高精度的几何轨道. 本文研究基于星载 GPS 非差数据的

COSMIC 卫星运动学精密定轨, 验证 COSMIC 的实际几何定轨能力.

1 星载 GPS 观测模拟

GPS 基本观测量为伪距 P 和相位 $L^{[15]}$, 低轨卫星星载 GPS 观测方程可表示为

$$P_i = \rho + c(\hat{\delta}_{\text{EO}} - \delta^{\text{GPS}}) + c(\Delta r_{\text{LEO}} - \Delta r^{\text{GPS}}) + I_i + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$L_i = \rho + c(\hat{\delta}_{\text{EO}} - \delta^{\text{GPS}}) + c(\Delta r_{\text{LEO}} - \Delta r^{\text{GPS}}) - I_i + \lambda_i N_i + \varepsilon_L \quad (2)$$

其中, $\rho = [(x_{\text{LEO}} - x^{\text{GPS}})^2 + (y_{\text{LEO}} - y^{\text{GPS}})^2 + (z_{\text{LEO}} - z^{\text{GPS}})^2]^{\frac{1}{2}}$ 是 LEO 卫星与 GPS 卫星之间的几何距离, c 为光速, $\hat{\delta}_{\text{EO}}$ 为星载 GPS 接收机时钟误差, δ^{GPS} 为 GPS 卫星时钟误差, $\Delta r_{\text{LEO}} = -\frac{2r_{\text{LEO}} \dot{r}_{\text{LEO}}}{c^2}$ 为相对论效应对接收机时钟的影响, $r_{\text{LEO}} = [x_{\text{LEO}} \ y_{\text{LEO}} \ z_{\text{LEO}}]^T$, $\dot{r}_{\text{LEO}} = \frac{dr_{\text{LEO}}}{dt}$, $\Delta r^{\text{GPS}} = -\frac{2r^{\text{GPS}} \dot{r}^{\text{GPS}}}{c^2}$ 为相对论效应对 GPS 卫星时钟的影响, $r^{\text{GPS}} = [x^{\text{GPS}} \ y^{\text{GPS}} \ z^{\text{GPS}}]^T$, $\dot{r}^{\text{GPS}} = \frac{dr^{\text{GPS}}}{dt}$, I_i 为电离层延迟, λ_i 为波长, N_i 为初始相位模糊度, ε_p 为伪距噪声, ε_L 为相位噪声, $i = 1, 2$ 对应于频率 $f_1 = 1575.42 \text{ MHz}$ 和 $f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$.

IGS 及其分析中心提供 GPS 轨道服务^[12]. GPS 轨道包括广播星历、超快轨道、快速轨道和最终轨道. 广播星历精度只有 $\sim 2 \text{ m}$, 但可以实时获取. 超快轨道精度 $< 10 \text{ cm}$, 可以实时或者准实时获取. 快速轨道精度达到 5 cm , 只能 12 h 后获得. 最终轨道精度 $< 5 \text{ cm}$, 但大约两周后才能获得, 只能适用于后处理的精密定轨和定位.

为了模拟星载 GPS 观测, 低轨卫星轨道采用密切轨道, 以设计轨道为初始值, 考虑潮汐摄动、日月引力摄动等保守摄动, 地球重力场模型采用 EIGEN2 (70 阶次), 日月摄动采用 DE200, 没有考虑其他行星的摄动.

IGS 也提供 5 min 一笔的 GPS 时钟改正, 而模拟星载 GPS 观测采样率是 30 s 一笔, 因此需要 30 s 一笔的 GPS 时钟改正. 可以将 5 min 一笔的 GPS 时

钟改正数据通过多项式内插为 30 s 一笔, 但结果精度并不高^[12]. JPL (Jet Propulsion Laboratory) 从 1999 年 5 月提供 30 s 一笔的 GPS 时钟数据, 但有很多历元缺失数据. CODE 从 2004 年也提供连续的 30 s 一笔的 GPS 时钟改正, 精度优于 0.1 ns. 本文星载 GPS 模拟采用与 GPS 卫星星历一致的 CODE 的 30 s 精密时钟数据.

因为只是 GPS 观测量的模拟, 认为接收机完全与 GPS 时钟同步, 忽略多路径效应的影响. 实际模拟时, 考虑了 POD +X 和 -X 天线相对于卫星质心的偏差. 在卫星体固框架 (X 轴指向飞行方向, Z 轴为指向地心, Y 轴垂直于 X 和 Z 轴, 构成右手系, 坐标系原点为卫星质量中心) 下, POD +X 天线和 -X 天线的位置见表 1, 视准向量和方位向量见表 2.

表 1 POD + X 和 -X 天线物理参数

天线	X/m	Y/m	Z/m	天线天顶与 X 轴之夹角/ $^\circ$
POD + X	0.4721	-0.0006	-0.2697	14.81
POD - X	-0.4702	-0.0008	-0.2745	15.35

表 2 POD 天线的视准向量和方位向量

天线	视准向量			方位向量		
	X	Y	Z	X	Y	Z
POD + X	0.9667	0.0000	-0.2556	-0.9643	0.0000	-0.2647
POD - X	-0.2556	0.0000	-0.9667	0.2647	0.0000	-0.9643

Leick 认为 P 码伪距观测噪声为 $30\text{ cm}^{[15]}$, 因此模拟时, 伪距随机误差为 $\epsilon_p = 0.3\text{ m}$, 相位随机误差预设为 $\epsilon_\phi = 0.01\text{ m}$. 表 3 给出了本文模拟采用的基本模型和参数, 模拟了 2004 年年积日 102 天 (4 月 11 日) 一天的一颗 COSMIC 卫星的星载 GPS 观测数据.

表 3 采用的基本模型和参数

地球重力场模型: EIGEN2(70 阶次)	卫星高度: 800 km	采样间隔: 30 s
日月摄动模型: DE200	卫星面质比: 0.01	伪距随机误差: 0.3 m
GPS 星历和时钟: CODE 最终星历和高 频时钟	卫星轨道倾角: 72°	相位随机误差: 0.01 m
岁差和章动: IA U2000	潮汐: OT-CSRC 和 IERS2000	地球自转: CODE

图 1 给出了模拟的 POD +X 和 -X 天线能够接收到的 GPS 卫星的观测数量, 两个天线各自接收到的 GPS 卫星数为 1—9 颗, 并且约有 20% 的观测量

不足 4 颗卫星, POD -X 天线接受到的 GPS 卫星数略优于 +X 天线. 主要是由于 COSMIC 的两个 POD 天线沿飞行方向位于卫星本体两侧, 天线的视准向量并非指向卫星天顶, POD -X 天线的视准向量与天顶方向之间的夹角为 74.65° , 小于 +X 天线的视准向量与天顶方向之间的夹角 (75.19°), 在天线盘局部地平以上约有 62° 的空间被地球遮挡, 因此最多可以观测到 9 颗 GPS 卫星.

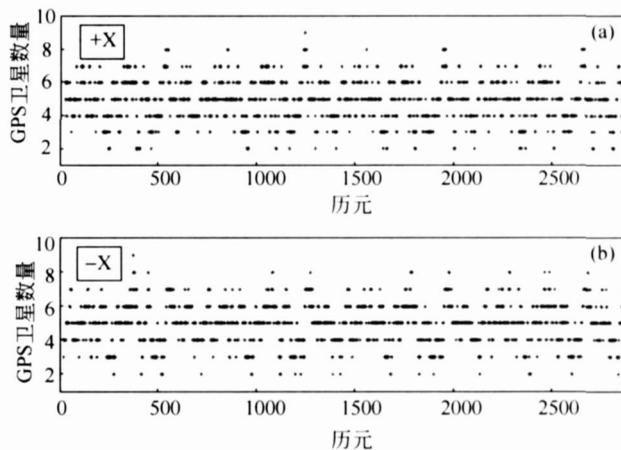


图 1 POD + X(a) 和 -X(b) 天线接收的 GPS 数量

2 COSMIC 精密几何定轨

因为电离层延迟与频率的平方成反比, 可以通过无电离层线性组合 LC 消除电离层的一阶影响^[15, 16], 即

$$LC = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 = \rho + c(\hat{d}_{E0} - \delta^{\text{PS}}) + c(\Delta r_{\text{LEO}} - \Delta r^{\text{GPS}}) + B_3 + \epsilon_{LC} \quad (3)$$

式中 $B_3 = N_1(\lambda_1 + \lambda_2) + \frac{cf_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(N_1 - N_2)$, ϵ_{LC} 为噪声.

设 L_1 和 L_2 是等精度独立观测, 精度为 σ_1 , 那么 LC 的精度为

$$\sigma_{LC} = \frac{\sigma_1 \sqrt{f_1^4 + f_2^4}}{f_1^2 - f_2^2} \approx 3\sigma_1 \quad (4)$$

也就是说, 通过无电离层线性组合, 虽然消除了电离层一阶延迟, 但观测量的精度却降低了.

以(3)式为观测方程, 采用纯几何方式(精密单点定位), 采用与星载 GPS 观测模拟时用的 GPS 星历和时钟, 利用最小二乘法进行参数估计, 未知参数包括每个历元的卫星坐标和整周模糊度, 因此每个历元至少观测到 4 颗 GPS 卫星, 才可以解算未知参数. 如果一个历元仅有 4 颗 GPS 卫星观测, 解算结果精度并不高.

以产生模拟星载 GPS 观测数据时给定的 COSMIC 密切轨道作为真实轨道, 将由 POD + X 和 -X 的观测数据得到的几何定轨结果分别进行比较, 图 2 给出了 POD + X 几何定轨结果与参考轨道之间的差异. 图 3 给出了 POD - X 几何定轨结果与参考轨道之间的差异. 表 4 给出了 POD + X 和 -X 的几何定轨结果与参考轨道之间的差异统计.

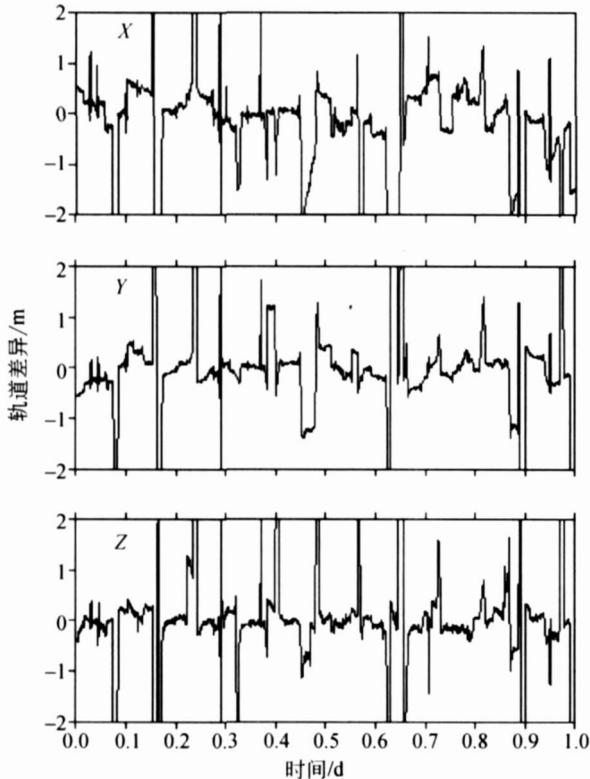


图 2 POD + X 天线几何定轨结果与真实轨道差异比较

由 POD + X 和 -X 天线单独给出的几何定轨结果精度仅为 m 级, 二者定轨精度一致, 但远远大于相位观测的随机误差. 这主要是每个天线在很多历元观测到的 GPS 卫星数量偏少, 如果少于 4 颗就无法解算参数, 造成定轨结果不连续; 即使观测

到 4 颗 GPS 卫星, 几何定轨结果可靠性也不高. 图 2 和 3 中出现许多尖峰, 就是观测质量和数量不够造成的. 因此单独使用一个天线(POD + X 或者 -X), COSMIC 的几何定轨精度并不高.

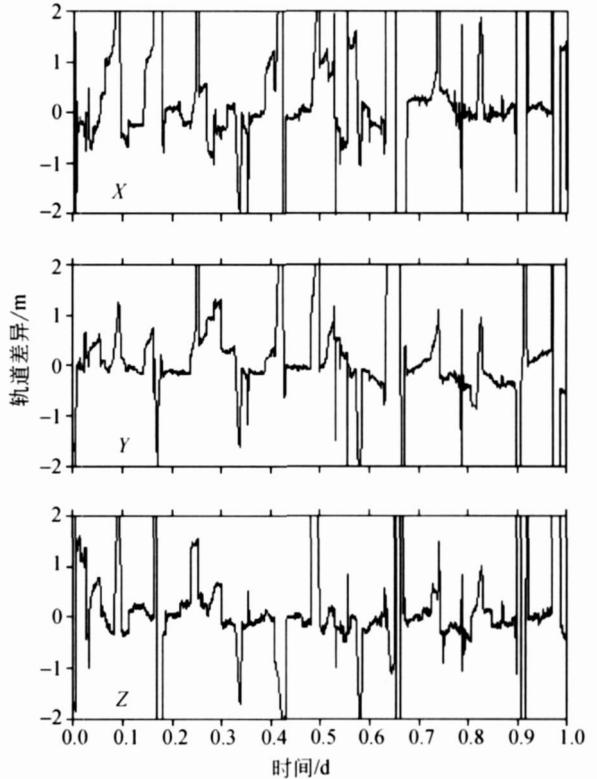


图 3 POD - X 天线定轨结果与真实轨道差异比较

表 4 几何定轨结果与真实轨道的差异统计 (单位: m)

分量	POD + X		POD - X	
	平均差异	标准差	平均差异	标准差
X	-0.493	4.078	-0.258	8.058
Y	-0.116	3.166	-0.054	2.417
Z	0.122	11.064	1.386	14.136

为了提高定轨精度, 将几何定轨结果中, 与真实轨道差异大于 1.0 m 的作为粗差, 剔除粗差, 该历元的几何定轨结果就用对应历元的简化动力学定轨结果替代, 因为简化动力学定轨结果可以达到分米、甚至厘米量级^[6]. 因为剔除的部分只占总数的约 20%, 可以认为这种组合轨道为准几何轨道. 然后, 利用 Gauss 滤波^[17]对定轨结果进行平滑, 得到平滑轨道. 图 4 和图 5 分别给出了 POD + X 和 -X

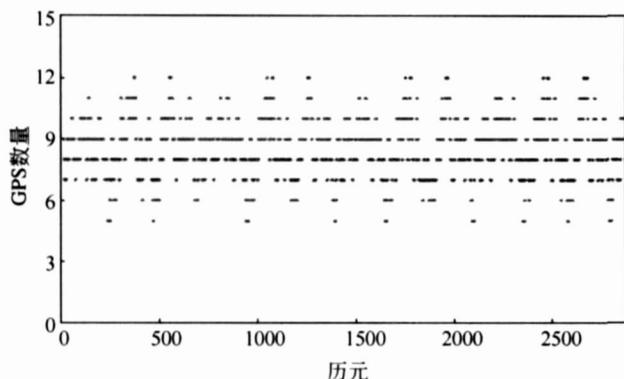


图 7 虚拟天线接收的 GPS 数量

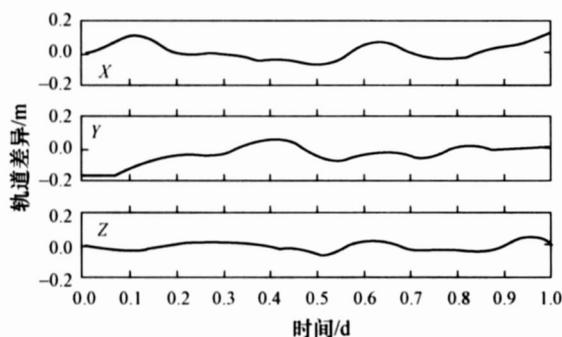


图 8 虚拟天线定轨结果与真实轨道的差异

表 6 改善的几何定轨结果统计 (单位: m)

分量	平均差异	标准差
X	0.004	0.036
Y	-0.011	0.026
Z	-0.002	0.029

4 结论

COSMIC 是用于气象、电离层和大地测量研究的卫星任务. 为了确保 COSMIC 任务的顺利执行, 验证精密几何定轨能力, 保证大地测量研究, 本文进行了 COSMIC 星载 GPS 观测模拟以及精密几何定轨研究. 利用 CODE 的 GPS 轨道和时钟数据, 给定 COSMIC 设计轨道, 并给予一定的随机误差, 模拟产生星载 GPS 观测量. 利用运动学方法, 由非差无电离层线性组合观测量进行精密定轨, 单独利用 POD + X 或者 -X 天线的定轨精度一致, 但远远大于给定的随机误差. 主要是 POD 天线的设计位置造成的. 通过虚拟天线技术, 将 POD + X 和 -X 两个天线的观测约化到一个位于卫星质心的虚拟天线, 然后利用几何法进行定轨, 定轨精度与给定的随机误差一致, 通过模拟试验, 对于 COSMIC

卫星, 验证了基于星载 GPS 的几何定轨能力.

致谢 感谢瑞士 University of Berne 的 Hugentobler U. 博士和德国 Technical University of Munich 的 Švehla D. 博士的建议.

参 考 文 献

- 1 王成机. 以低轨卫星追踪资料推求地球重力场及其时变: CHAMP 及 GRACE 卫星任务个案研究. 博士论文. 新竹: 国立交通大学, 2005
- 2 Hwang C. Gravity recovery using COSMIC GPS data: Application of orbital perturbation theory. *Journal of Geodesy*, 2001, 75: 117-136
- 3 Chao BF, Pavlis EC, Hwang C, et al. COSMIC: Improving earth's gravity model and other geodetic application. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, 11(1): 365-378
- 4 Montenbruck O, Gill E. *Satellite Orbits: Models, Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2000
- 5 Tapley BD, Schutz BE, Born GH. *Statistical Orbit Determination*. Burlington: Elsevier Academic Press, 2004
- 6 郭金运. 由星载 GPS 进行低轨卫星动力学定轨和地球重力场模型解算. 西安: 西安地图出版社, 2006
- 7 Seeber G. *Satellite Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter & Co, 1993
- 8 郭金运, 黄金维, 胡建国, 等. 由星载 GPS 双差相位数据进行 CHAMP 卫星动力学定轨. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(3): 213-217
- 9 Wu SC, Yunk TP, Thornton CL. Reduced-dynamic technique for precise orbit determination of low earth satellites. *Journal of Guidance*, 1990, 14(1): 24-30
- 10 Visser P NAM, van den IJssel J. Aiming at a 1 cm orbit for low earth orbiters: Reduced-dynamic and kinematic precise orbit determination. *Space Science Reviews*, 2003, 108: 27-36
- 11 Schutz LE, Tapley BD, Abusali PAM, et al. Dynamic orbit determination using GPS measurements from TOPEX/Poseidon. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(19): 2179-2182
- 12 Bock H. Efficient methods for determining precise orbits of low earth orbiters using the global positioning system. Ph. D. thesis. Astronomical Institute University of Bern, Switzerland, 2003
- 13 <http://nng.esa.de/gps/igsleo.html> [2006-2-8]
- 14 National Research Council. *Satellite Gravity and the Geosphere: Contributions To the Study of the Solid Earth and Its Fluid Envelopes*. Washington: National Academy Press, 1997
- 15 Leick A. *GPS Satellite Surveying*, 3rd edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2004
- 16 周忠谟, 易杰军, 周琪. *GPS 卫星测量原理与应用*. 第二版. 北京: 测绘出版社, 1999
- 17 Hou FL, Zhu F. Filter algorithm for visual tracking of maneuvering target. *Position Location and Navigation Symposium, PLANS2004*, 2004, 315-320