

由星载 GPS 双差相位数据进行 CHAMP 卫星动力学定轨

郭金运^{1,2} 黄金维² 胡建国³ 李建成⁴

(1 徐州师范大学国土信息与测绘工程系, 徐州市铜山新区上海路 29 号, 221116)

(2 台湾交通大学土木工程学系, 新竹市大学路 1001 号, 30050)

(3 中国测绘科学研究院, 北京市海淀区北太平路 16 号, 100039)

(4 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 为了确定 CHAMP 卫星的轨道, 由星载 GPS 数据和 IGS 跟踪站的 GPS 数据构造星地相位双差观测量, 利用 EOP、SGO、时间等数据, 对 GPS 数据进行预处理, 包括钟差改正、模糊度解算和周跳探测、卫星姿态改正、天线偏差和相位中心改正等, 采用 CHAMP 卫星受力摄动模型, 根据动力学原理, 对 CHAMP 卫星进行实际定轨。与德国 GFZ 定轨结果 PSO 相比, 本方法定轨结果径向精度为 0.285 7 m。对于 1 d 的重叠轨道, 径向轨道差异的 RMS 为 0.095 8 m。对于轨道端点比较, 径向轨道差异平均为 0.066 6 m。

关键词: CHAMP 卫星; GPS 双差相位数据; 卫星定轨; 动力学方法

中图法分类号: P228.42

卫星定轨是卫星任务顺利执行的关键之一, 而卫星定轨方法很多, 传统的定轨方法大多采用摄影照相、SLR、DORIS、PRARE 等地面跟踪系统。测地卫星轨道一般比较低, 传统方法只能获得某一时刻单一观测量, 如方向、距离、距离变率、频移等, 必须依赖卫星的精确受力模型获取卫星的三维状态^[1]。因此, 用传统定轨方法测轨, 地球引力场、大气阻力扰动、太阳光压摄动和潮汐摄动等严重影响卫星定轨精度的提高^[2], 因为力模型误差必然引起轨道误差。目前, 较为有效的提高低轨卫星定轨精度的手段就是采用星载 GPS 技术进行卫星跟踪, 结合地面高精度 GPS 跟踪观测, 利用星载 GPS 数据直接解算低轨卫星的实时状态, 或者利用差分技术, 利用几何法、动力学法、半动力学方法进行精密定轨, 定轨精度可达 dm 甚至 cm 级^[3]。GPS 定位精度可达到 mm 级, 可以提供卫星的三维观测量, 动力学定轨结果和 GPS 测量结果之差可以表征力模型误差, 用来精化力模型。

20 世纪 80 年代, 美国在 Landsat-4 卫星上进

行实际 GPS 定轨实验, 测轨精度达几十 m。Ananda & Chernick 实验了几个 GPS 差分跟踪技术, 认为由 GPS 进行精密定轨可达 dm 级^[4]。通过协方差分析, Yunck 等认为利用 GPS 技术进行卫星定轨, 径向精度可达到 dm 级^[5]。1992 年发射的海洋测高卫星 Topex/Poseidon, 采用星载 GPS 测轨方案, 由 GPS 半动力学方法确定的 Topex/Poseidon 卫星的轨道径向精度达到 3 cm^[1]。因此, 在后续的测地卫星任务, 如 CHAMP、Jason-1 和 GRACE 等卫星, 都装载有星载 GPS 接收机, 用于精密定轨、重力恢复、大气和电离层探测以及海洋科学等研究。CHAMP (challenging minisatellite payload) 是用于地球科学与大气研究及其应用的德国小卫星任务, 具有高精度、多功能、完全星载的设备, 如 GPS 接收机、磁力计、加速度计、STAR 传感器等, 是近极低轨卫星^[6]。本文利用 CHAMP 星载 GPS 数据和 IGS 跟踪站的 GPS 数据构成星地相位双差观测量, 采用动力学方法, 用改进的 GEODYN II 软件

收稿日期: 2005-12-31。

项目来源: 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金资助项目(02-09-13); 山东省重点实验室开放研究基金资助项目(SD2003-4); FIG Foundation 资助项目; 山东省自然科学基金资助项目(Y2003E01); 江苏省高校自然科学基金资助项目(05KJB170129)。

进行 CHAMP 卫星定轨。

1 卫星轨道估计

卫星定轨就是确定卫星的状态, 卫星状态包括卫星的轨道根数或者卫星的位置和速度, 以及力模型和观测模型中的参数^[7]。一般不能直接观测卫星的状态, 只能根据观测量与卫星状态之间的关系确定卫星轨道的最优估计。设有观测量 O , 对应的理论值为 $C = C(t, P)$, $P = (P_j)$ 为参数矢量, 理论上 $O = C$ 。已知参数 P 的先验值 P_a , 两者之差为 $dP = P - P_a$ 。在时刻 t_i , 观测量为 $O_i = O(t_i)$, 由参数先验值计算的理论值为 $C_i = C(t_i, P_a)$ 。由于各种误差的影响, 则有:

$$O_i - C_i = \sum_j \frac{\partial C_i}{\partial P_j} dP_j + dO_i \quad (1)$$

式中, dP_j 为第 j 个参数的改正; dO_i 为第 i 个观测量的误差。与观测噪声不同, dO_i 说明 O_i 与 C_i 的不一致性, 包括观测噪声和模型误差。卫星轨道估计的基本问题, 就是利用观测量 O_i 确定式(1)的参数解 dP 。在卫星定轨中, 参数包括初始历元的卫星位置和速度、力模型参数、观测值位置和观测值偏差^[8]。这些参数可以划分为两类, 即与卫星动力学无关的参数 α 和与动力学有关的参数 β , 所以 $P = [\alpha \ \beta]$ 。因此, 有:

$$\frac{\partial C_i}{\partial P} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_i}{\partial \alpha} & \frac{\partial C_i}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\frac{\partial C_i}{\partial \beta} = \frac{\partial C_i}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \beta}$, $\frac{\partial x_i}{\partial \beta}$ 称为变分。变分是瞬间卫星状态相对于各参数的偏导数, 是由变分方程积分得到。设卫星的位置为 $r = (r_1, r_2, r_3)$, 速度为 $\dot{r} = (\dot{r}_1, \dot{r}_2, \dot{r}_3)$, 那么卫星的状态为 $x_i = (r, \dot{r})$ 。设 β 中有 n 个参数, 那么变分方程为^[8,9]:

$$F = (V + D) X_m + f \quad (3)$$

卫星状态由 Cowell II 数值积分法对卫星运动微分方程进行数值积分得到^[9]。在计算时, 可以将参数划分为单个弧度参数和所有弧度共有参数, 单个弧度参数与其他弧度参数是不相关的。这样, 式(1)就由分块 Bayes 最小二乘参数估计进行求解^[8]。所有的弧度单独平差计算, 然后再计算所有弧段共有参数。求解时, 为了稳定和简化解算结果, 部分参数可以认为是已知的, 如地球重力场模型参数等。

2 GPS 数据和相关数据

机, 观测数据可由德国 GFZ ISDC (information system and data center) 获取, 数据采样率为 10 s。在 2001 年 5 月, 选取 6 d (21 日~ 26 日), 共下载了 6 d 的 CHAMP 星载 GPS 观测数据 (RINEX 格式)。

为了精确确定 CHAMP 卫星的轨道, 采用星地 GPS 相位双差观测量作为基本观测量, 因此, 需要地面 IGS (International GPS Service) 跟踪站的 GPS 观测数据。根据站点分布均匀、观测量尽可能多、每天观测量至少约在 200 KB 以上 (CRINEX 格式)、观测精度高、站点稳定、能够实现连续观测等特点, 选择了 48 个 IGS 跟踪站对 CHAMP 卫星进行跟踪。

为了时间统一、坐标变换和各项改正, 由国际地球自转服务 (International Earth Rotation Service, IERS) 以及美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 下载地球定向参数 (Earth orientation parameters, EOP)、太阳和地磁观测量 (solar and geomagnetic observation, SGO)。EOP 数据形式有 IERS 的 EOP 文件 eop97c04.YR、Bulletin A (Bula.nnn)、Bulletin B (Bulb.nnn)、Bulletin C (Bulletinc.dat)。SGO 数据有每天的太阳和地磁引数 (YEAR 或者 YEAR.vm)、每天的地磁数据 (DGD.txt)、每天的太阳数据 (DSD.txt)、向前 45 d 的太阳和地磁预计数据 (45DF.txt)、每月预计的太阳周期的平均 10.7 cm 流明数据 (Predict.txt)。时间数据有 TAI-UTC、ATI-UTC 和 TAI-A1 等数据。

首先对 GPS 数据进行预处理。对 GPS 数据进行钟差改正、气象改正、天线偏差和相位中心改正、卫星姿态改正、周跳探测和修复、整周模糊度的解算等, 最后构成星地 GPS 相位双差观测量^[10]。

3 解算结果与分析

对 GPS 数据进行分组, 分为三种情况分别处理: ① 从 6 d 数据选取 24 日~ 26 日作为一个弧段; ② 将 21 日~ 25 日 5 d 数据分为两个弧段, 其中有一天的重复, 即 21 日 0 h~ 23 日 24 h 和 23 日 0 h~ 25 日 24 h; ③ 将 6 d 数据分为每天一个弧段, 共有无重复的 6 个弧段。对这三种情况, 分别进行轨道计算, 表 1 给出了轨道解算中用到的模型。

由于采用的软件、数据编辑、数据类型、数据处理策略等不同, 因此不同机构产生的轨道会有

所不同, 比较不同机构的卫星轨道能够探测定轨

表 1 CHAMP 定轨标准模型

Tab. 1 Standard Model for Determination Orbit of CHAMP

模型	标准	备注
协议惯性系	J2000	IERS
岁差	1976IAU	IERS
章动	1980IAU	IERS
星历	JPL DE 405	IERS
参考框架	极移	✓
站坐标	IT RF2000, 历元 1997. 0	
参考椭球元素	$a_e = 6\ 378\ 136.3\ \text{m}$ $1/f = 298.257$	IERS
GPS 星历	广播星历	IGS
光速	$c = 29.979\ 245\ 8\ \text{km/s}$	
GM_e	$398\ 600.441\ 5\ \text{km}^3/\text{s}^2$	IERS
地球重力场模型	EGM96	
多体摄动	JPL DE 200	
固体潮	EGM96	
海潮	EGM96	
极潮	$k_2 = 0.3$	IERS+
相对论效应	✓	
力模型	太阳气压	✓
地球辐射压	✓	IERS
大气阻力	M SIS Empirical Drag model $x = -1\ 488.0\ \text{mm}$ $y = 0.0\ \text{mm}$	
卫星参数	$z = -392.8\ \text{m}$ 质量: 522 kg; 面质比: $0.001\ 38\ \text{m}^2/\text{kg}$	GFZ
经验加速度	9 参数模型	
观测量	GPS 相位	星地双差观测量

中的数据误差。德国 GFZ 解算了 CHAMP 卫星的轨道 PSO (post-processed science orbit), PSO 已成为 CHAMP 任务的标准产品^[6]。

对于第一种情况, 2001 年 5 月 24 日~ 26 日作为一个弧段, 本文所解算轨道与 GFZ 的 PSO 进行比较, 图 1 给出了二者轨道差异在径向、沿轨方向和轨道法向的分量。可以看出, 沿轨方向的差异最大, 径向差异次之, 轨道法向的差异最小, 平均值相差在 6 cm 以内, 总的轨道差异的 RMS 为 0.687 7 m, 径向轨道差异的 RMS 为 0.285 7 m, 沿轨方向差异约为径向差异的 2.1 倍。两者差异的主要原因有: 本文计算中卫星摄动采用模型进行模拟, 而 PSO 是利用星载加速度计数据; 本文虽然经过 GPS 数据预处理, 在轨道计算中模糊度作为固定参数, 但 GPS 相位数据中仍残存有未探测到的周跳, 预处理中得到的模糊度有一定的误差; 本文计算过程中, 只有 6 个 IGS 站进行了气象改正, 因此气象影响也是不容忽视的原因之一; 计算过程中, 存在模型误差、计算误差, 同时数据的编辑和校正策略也不同。

第二种情况是将 2001 年 5 月 21 日~ 25 日共 5 d 的观测数据分为两个弧段, 即 21 d0 h~ 23 d24 h 和 23 d0 h~ 25 d24 h, 这样两个弧段就有 1 d 的重叠。图 3 给出了重叠轨道在径向、沿轨方向和轨道法向的差异。从图 2 可以看出, 在沿轨方向差异最大, 径向差异次之, 轨道法向差异最小, 平均差异在 8 cm 之内, 总的轨道差异 RMS 为 0.211 0 m, 径向轨道差异的 RMS 为 0.095 8 m, 沿轨法向的差异约为径向差异的 1.83 倍。1 d 重叠轨道有 0.211 m 的差异, 主要原因有: 距离积分参考历元不同, 造成积分累计误差不同, 第一个弧段的参考历元是 20 d23 h59 min47 s, 第二个弧段的参考历元为 22 d23 h59 min47 s; 卫星初始状态的精度也有差异。在图 2(b) 中约 0.65 d 的地方有一个较大的轨道法向差异, 可能是星载 GPS 相位数据预处理时残留的模糊度或者周跳影响。

第三种情况将 6 d 的观测数据分为 6 个弧段, 每天一个弧段, 分别进行计算。这样相邻两个弧段就有一个时间点的重叠, 称为端点重叠。比较相邻轨道弧段起点和终点的差别, 终点比较表

明一个弧段到下一个弧段的轨道偏移,这是力模型和观测模型误差累计的结果,因为这两个弧段所采用的数据或者参数不同。由于只在弧段终点进行比较,在终点确定的轨道误差一般较大,因此这种方法要求较为严格。表2给出了重叠端点之间差别的统计结果。可以看出,沿轨方向差异最

大,径向差异次之,轨道法向差异最小。总体轨道最大差异达到0.7 m,平均差异为0.490 8 m,主要原因有:参考初始历元不同;模型误差、观测误差和计算误差累积;相邻两个弧段的观测数据不同;卫星初始状态精度不同。

由星地GPS相位双差观测量、时间数据、太

表2 端点重叠轨道比较统计结果/m

Tab.2 Difference Among the Orbit Endpoints

时间	径向	沿轨	法向	总的差值
21 d23 h59 m in47 s	0.014 3	0.288 1	0.010 5	0.288 6
22 d23 h59 m in47 s	0.140 5	0.514 7	-0.076 2	0.538 9
23 d23 h59 m in47 s	0.062 7	0.694 2	-0.103 3	0.704 6
24 d23 h59 m in47 s	0.013 1	-0.229 0	-0.047 8	0.234 3
25 d23 h59 m in47 s	0.102 6	-0.679 4	0.018 5	0.687 4
平均	0.066 6	0.117 7	-0.039 7	0.490 85

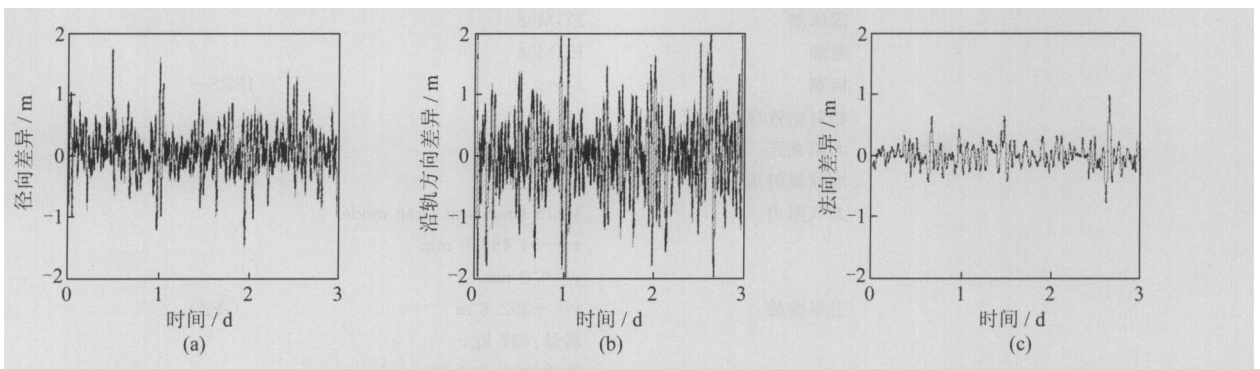


图1 所解算轨道与GFZ PSO的差异

Fig.1 Differences Between the Solution and GFZ PSO

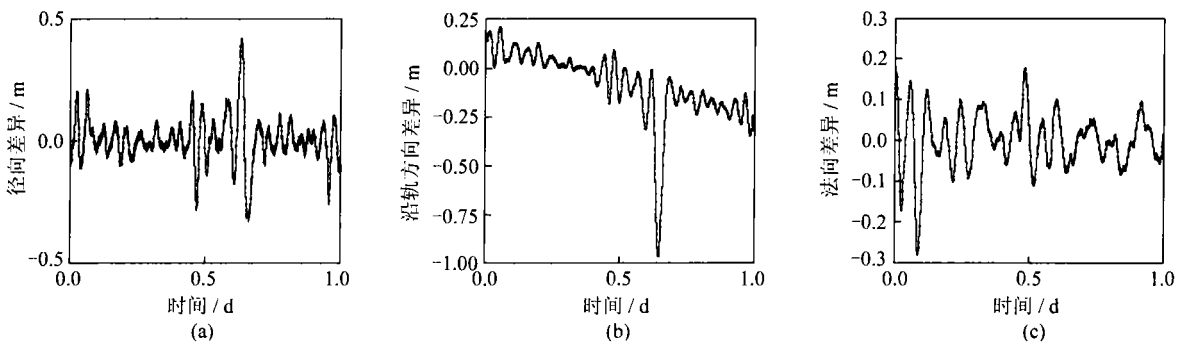


图2 解算轨道重叠部分之间的差异

Fig.2 Difference Between the Overlapping Parts

阳通量、地磁活动、地球自转参数等,利用卫星受到的各种摄动模型,采用动力学方法,对CHAMP卫星进行了实际定轨,轨道总体精度为dm级。主要原因在于:各种摄动都是采用模型进行模拟,而没有采用CHAMP星载加速度计的观测数据,同时还有模型误差、解算误差、数据编辑、校正策略差异、参考历元以及初始状态精度等。如果充分利用星载加速度计观测数据,可以很好地提高定轨精度。由于2001年的加速度计数据校准不

完善,因此本文没有使用。

致谢:感谢德国GFZ的Zhu教授、美国NASA的Rowlands博士和van Martin Systems, Inc.的Martin先生的建议和指导;感谢德国GFZ提供CHAMP观测数据。

参 考 文 献

[1] Bertiger W I, Bař-Sever Y E, Christensen E J, et al. GPS Precise Tracking of TOPEX/POSEIDON:

- Results and Implications[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24 449~ 24 464
- [2] Seeber G. Satellite Geodesy[M]. Berlin: Walter de Gruyter & Co., 1993
- [3] Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits Models, Methods and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000
- [4] Ananda M P, Chernick M R. High-accuracy Orbit Determination of Near-earth Satellite Using Global Positioning System (GPS) [C]. IEEE PLANS' 82, Atlantic, 1982
- [5] Yunck T P. Non-dynamic Decimeter Tracking of Earth Satellites Using the Global Positioning System[C]. AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting, Am. Inst. of Aeron. and Astron., Reno, 1986
- [6] König R, Reigber C h. CHAMP Rapid Orbit Determination for GPS Atmospheric Limb Sounding[J]. Adv. Space Res., 2002, 30(2): 289~ 293
- [7] Tapley B D. Fundamentals of Orbit Determination [C]. Theory of Satellite Geodesy and Gravity Field Determination. Lecture Notes in Earth Sciences Berlin: Springer-Verlag, 1989
- [8] McCarthy J J, Rowton S, Moore D, et al. GEO-DYN II System Description (Volume 1) [C]. NASA, USA, 1993
- [9] Balmino G, Barriot J B. Numerical Integration Techniques Revised [J]. Manuscripta Geodetica, 1989, 15: 1~ 10
- [10] 胡建国, 郭金运, 黄金维. CHAMP 星载 GPS 观测数据预处理研究[C]. 两岸重力和大地水准面研讨会, 新竹, 2003

第一作者简介: 郭金运, 教授, 博士。主要从事卫星大地测量和地球重力场模型等方面的研究和教学工作。

E-mail: jinyunguo1@sohu.com

Determination of CHAMP Orbit from Onboard GPS Double-Difference Phase Data with Dynamic Method

GUO Jinyun^{1,2} H WANG Cheinway² H U Jianguo³ LI Jiancheng⁴

(1 Department of Territory Information and Surveying Engineering, Xuzhou Normal University, 29 Shanghai Road, Tongshan New District, Xuzhou 221116, China)

(2 Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, 1001 Ta Hsueh Road, Hsingchu 30050, China)

(3 Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 Beitaping Road, Beijing 100039, China)

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

Abstract: In order to determine the CHAMP's orbit, the onboard GPS data of CHAMP, the GPS data of IGS tracking stations, EOP, SGO and time data are necessary. The GPS data should be pre-processed to correct the clock error, solve the ambiguity, detect the cycle slips, determine the satellite attitude, and calculate the antenna phase center offset and correction. Then the air-ground GPS double-difference phase observations are constructed. The CHAMP's orbit is really determined with the dynamic method. Comparing with the PSO from German GFZ, the precision (RMS) in the radial direction is 0.285 7 m. For the 1-day overlapping orbit, the RMS of radial orbit difference is 0.095 8 m. Comparing the orbit end-points, the mean difference of radial orbit is 0.066 6 m.

Key words: CHAMP; GPS double-difference phase data; satellite orbit determination; dynamic method

About the first author: GUO Jinyun, professor, Ph. D. His research interests include the satellite geodesy and the satellite gravimetry.

E-mail: jinyunguo1@sohu.com