

CHAMP 卫星 cm 级精密定轨

赵齐乐¹ 刘经南^{1,2} 葛茂荣¹ 施 闯¹

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

(2 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

摘 要: 在卫星定位导航数据综合处理软件(PANDA 软件)的基础上, 解算了 2002 年年积日 126~131 d CHAMP 卫星的精密轨道, 并通过与 GFZ 精密轨道的比较、GPS 观测值的验后残差和 SLR 观测值检验等 3 种方式进行了轨道精度的评估。结果显示, 本文的轨道精度在径向为 4~5 cm, 切向和法向为 6~8 cm。

关键词: 精密定轨; CHAMP 卫星; 星载 GPS 数据

中图法分类号: P228.1; P228.41

利用卫星跟踪卫星(SST)模式获取高精度地球重力场信息, 重力卫星系统需要满足以下 3 个条件: 由于卫星轨道越低, 对重力场越敏感, 因此重力卫星轨道不能太高, 如 CHAMP 和 GRACE 卫星轨道仅为 450 km 左右; 由于地球重力场全球性分布特征, 需要高连续性、全球覆盖的高精度几何观测信息, 如高低卫星跟踪(HL-SST)模式和低低跟踪(LL-SST)模式, 用以提取卫星的运动状态和特征; 有效分离较低轨道带来的大气等非保守力和以重力场为主的保守力是获取高精度重力场模型的关键一环, 因此, 重力卫星需要装配高精度的加速度计^[1]。

德国地学研究中心(GFZ)主持实施的 CHAMP 重力卫星计划属于 HL-SST 模式, 要求卫星轨道的精度尽可能高, cm 级的精密定轨精度已成为获取高精度重力场的必要条件^[2]。本文主要研究 CHAMP 卫星的星载 GPS 数据精密定轨问题。

1 精密定轨策略及软件系统

1.1 精密定轨使用的观测数据

利用星载 GPS 数据实施低轨卫星精密定轨时, 较高采样率的 GPS 卫星的精密轨道和钟差是获取高精度定轨结果的前提^[3]。文中的 GPS 卫

星轨道采用 IGS 发布的精密星历, 而精密钟差通过地面 45 个 IGS 站的数据求解获得。

文中处理了 2002 年年积日 126~131 共 6 d 的 CHAMP 卫星星载 GPS 数据, 地面 IGS 跟踪站的数据和星载数据可以同时求解, 也可先利用地面站数据求得 GPS 卫星精密钟差, 然后利用星载数据确定 CHAMP 卫星轨道。联合解和分两步解的结果基本一致^[3,4]。同时, 由于考虑到坐标系统的转换以及卫星的运动状态, 文中还用到了卫星的姿态数据、加速度计数据以及建立大气阻力和光压等模型所需的电磁参数和太阳辐射流量数据等。

1.2 观测模型和动力模型

本文在精密定轨时, 处理的是消电离层的载波非差线性组合观测值 LC 和消电离层伪距非差线性组合观测值 PC^[5]。表 1 给出了具体的观测模型和估计参数。

在求解 CHAMP 卫星轨道时, 由于其轨道高度较低, 因此, 卫星所受的大气阻力是影响定轨精度的最大误差源。且由于 CHAMP 卫星上配备的加速度计未达到预期的精度, 因此, 在利用加速度计数据时, 需要较为频繁地调节其偏差(bias)参数。文中还考虑了利用太阳光压和大气阻力模型时 CHAMP 卫星精密定轨的情况, 详细的轨道动力模型见表 2。

表1 观测模型和估计参数

Tab. 1 Observation Models and Parameters

参数	模型	先验约束
观测量	LC 和 PC 的非差线性组合观测	L_1 0.02 circle, P_1 1.0 m
截止角	θ	
观测值加权	与高度角(e) 相关	$P = 1; e > 3\theta; P = \sin^2 e, e \leq 3\theta$
采样间隔	60 s	
相位缠绕	考虑	
对流层改正	Saastamoinen 模型+ 过程噪声	20 cm + 2 cm/sqrt(hour)
卫星钟差	预报钟差+ 过程噪声(将 ALGO 站钟固定为参考钟)	1 000 m+ 10 m/sqrt(hour)
接收机钟差	伪距估计+ 白噪声	300 m
EOP	固定为 IERS 结果	
卫星轨道	固定为 IGS 的最终精密星历	
测站坐标	作为未知待估参数(ALGO 站固定)	x, y, z 方向上均为 0.01 m
测站坐标改正	地球固体潮、极移潮汐、海洋潮汐	

表2 CHAMP 卫星轨道力学模型

Tab. 2 CHAMP Satellite Force Model and Parameters

模型	情况 1(加速度计)	情况 2(模型)
重力场	EIGEN CGS03C 120× 120 阶	EIGEN CGS03C 120× 120 阶
质心引力	太阳、月球和其他行星(DE405)	太阳、月球和其他行星(DE405)
潮汐	固体潮、极移潮和 30 阶的海潮	固体潮、极移潮和 30 阶的海潮
相对论效应	考虑	考虑
太阳光压	利用加速度计数据, 估计 3 个偏差参数和 3 个 rate 参数	采用截面积分, 不估计参数
大气阻力		采用截面积分, 密度模型用 DTM94, 每 4 h 估计一次参数
经验力模型	每 30 min 调节一次加速度计数据的 3 个偏差参数, rate 参数不变	每圈调节一次 3 个偏差参数和 6 个周期性参数

1.3 精密定轨软件系统

本文的研究平台为卫星定位导航数据综合处理软件(PANDA 软件)。目前, PANDA 软件能处理 GPS 和 SLR 数据, 能实施 GPS 导航星座的精密定轨和时间同步、低轨卫星的精密定轨、全球或者区域性跟踪网的精密定位^[4,5]。

本文充分利用 PANDA 软件解算全球观测数据, 实施 GPS 卫星精密定轨和时间同步的功能, 减少了对相关研究机构的依赖性, 同时保证了轨道和钟差的自恰性; PANDA 软件完备的星载 GPS 数据的预处理和基于观测值验后残差的再编辑功能是得到 CHAMP 卫星精密轨道的关键。

2 精密定轨结果及分析

由于星载 GPS 数据量大而且连续, 这使单天甚至更短弧段长度的精密轨道成为可能, 如 GFZ 提供的快速轨道长度仅为 14 h。文中为了计算方便, CHAMP 卫星的弧段长度为 24 h。本文分别在利用加速度计数据替代卫星非保守力以及使用非保守力模型两种情况下实施了 CHAMP 卫星的精密定轨。

2.1 定轨结果与 GFZ 精密轨道的比较

基于星载 GPS 数据的低轨卫星精密定轨相

对其他跟踪手段(如 SLR、DORIS 和 PRARE 等)来说复杂些, 其需要高精度的 GPS 星座的轨道和钟差, 而且还要精确求解模糊度参数。相同的数据在不同的模型和数据处理方案条件下可以得到不同的结果, 通过各个机构的轨道的相互比较, 可以推测轨道的精度。图 1 给出了文中的定轨结果与 GFZ 精密轨道互差的 RMS(由于篇幅有限, 这里只给出情况 1(利用加速度计)的结果)。

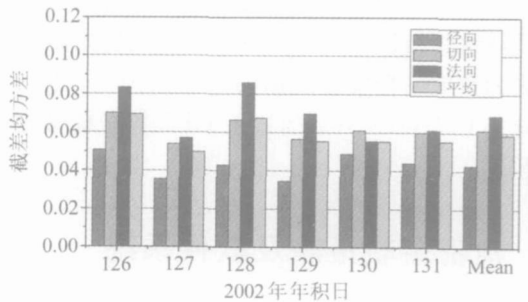


图1 文中的定轨结果与 GFZ 精密轨道比较的位置差的均方差

Fig. 1 Comparison of Orbit RMS of CHAMP Satellite with GFZ Two step Precise Orbits

从图 1 可知, 在上述两种动力模型的情况下, 文中的定轨结果和 GFZ 轨道的互差在径向的结果为 4~ 5 cm, 切向和法向为 6~ 8 cm, 总距离误差在 11 cm 左右, 这与 CSR、DEOS、JPL 和

TUM 等机构与 GFZ 精密轨道的互差基本相当^[6]。为了能清晰地观察轨道互差的特征,文中给出了互差最大的 128 d 的残差图(见图 2)。

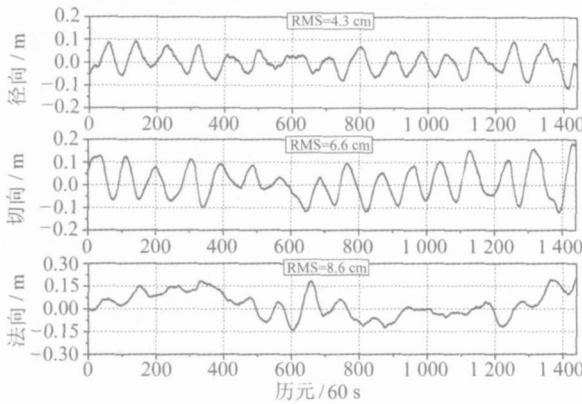


图 2 年积日 128 d 与 GFZ 精密轨道的位置互差
Fig. 2 CHAMP Orbit Residuals Between PANDA and GFZ on Day 128/2002

2.2 GPS 观测值的残差

尽管 GPS 观测值的残差不能完全代表轨道的精度,但残差的均方差(RMS)统计值在一定程度上体现了计算的内符合水平。由于星载 GPS 数据在通常情况下有足够多的多余观测,其残差的 RMS 可作为衡量定轨结果精度的一个重要指标。图 3 为载波和伪距组合观测值的验后残差。

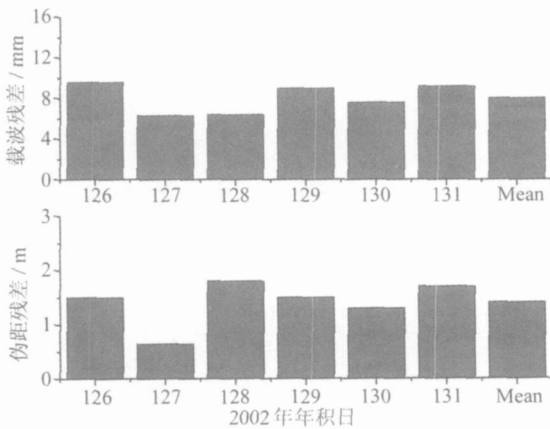


图 3 非差载波和伪距无电离层组合观测值残差的均方差
Fig. 3 RMS of LC and PC Residuals

图 3 中的观测值残差显示, LC 的残差的 RMS 基本上在 1 cm 以内,这一方面说明接收机的载波观测精度比较高,另一方面说明计算时较好地探测了周跳,计算结果的内符合精度较高。PC 观测值的残差在 1~ 2 m 之间,略有些偏高,但考虑到伪距的权不到载波数据的万分之一,对定轨结果的影响不明显。图 4 给出了 128 d 的残差序列图。图 4 显示,随着高度角的降低,残差值

明显增大,这主要受观测值权重的影响。

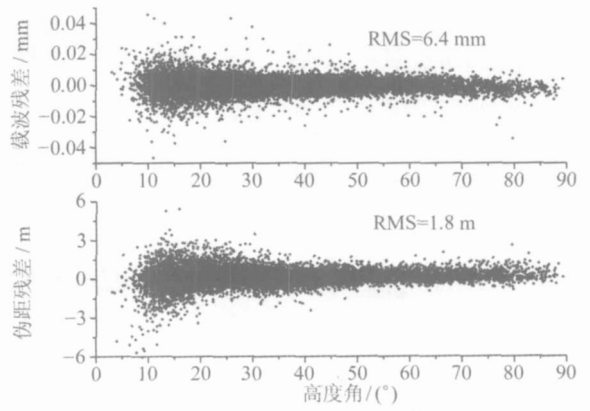


图 4 年积日 128 d 观测值的残差序列图

Fig. 4 Residuals of LC and PC on Day 128/2002

2.3 GPS 定轨结果与 SLR 观测值的比较

SLR 的观测值精度较高,且可以直接转换为距离,加上文中精密轨道的确定未使用 SLR 数据,因此,可利用 SLR 观测值检验文中轨道结果的外符合精度。图 5 是本文 SLR 观测值的检验结果(情况 1(利用加速度计))。

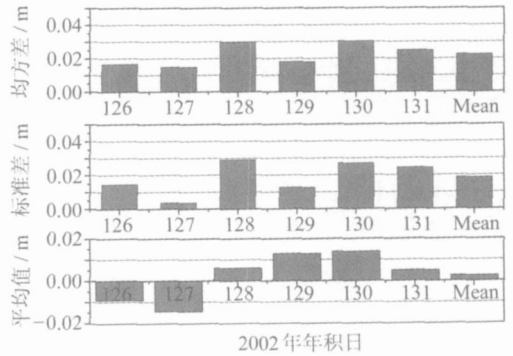


图 5 本文定轨结果的 SLR 观测值检验残差统计

Fig. 5 SLR Residuals for CHAMP Dynamic Orbits

图 5 显示,文中利用加速度计观测值的定轨结果的残差均方差为 2.3 cm,利用大气及光压模型的定轨结果为 3 cm。这一结果明显优于 IGS 公布的 3.3~ 26 cm 的结果,其原因可能是因为所采用的数据所处的时间段不一致引起的。为了进行更为可靠的比较,图 6 给出了对应时间段 GFZ 精密轨道的 SLR 观测值的检验结果。图 6 显示,GFZ 精密轨道的 SLR 观测值检验残差的均方差为 4 cm,这说明本文定轨结果的 SLR 的符合精度更高,这可能是因为文中使用了更为精确的重力场模型 EIGEN-CG03C,而 GFZ 使用的是当时精度相对较低的 EIGEN2-CHAMP 重力场模型。

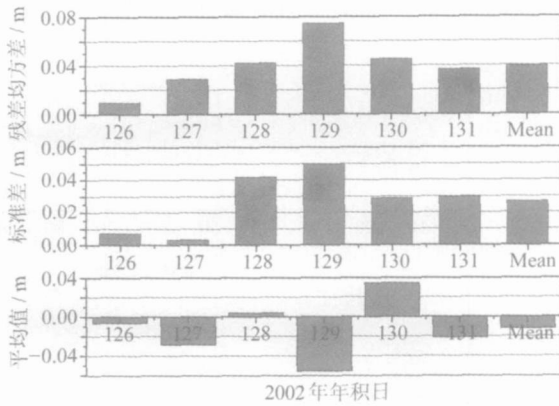


图6 相同时间段GFZ精密轨道的SLR观测值检验残差统计

Fig. 6 RMS, Standard Deviation and Bias of SLR Residuals of GFZ PSO Covering Same Period

3 结语

本文的定轨结果通过与GFZ精密轨道的比较、GPS观测值的验后残差和SLR观测值检验等3种方式进行了评估,与GFZ精密轨道的径向互差RMS为4~5 cm,切向和法向为6~8 cm;GPS载波组合LC的残差RMS优于1 cm,伪距残差RMS为1~2 m;SLR观测值检验残差的RMS为2~3 cm。综合3种评估方式可以推断,文中CHAMP卫星的精密定轨结果的精度在径向为4~5 cm,切向和法向为6~8 cm。文中结果即使在不使用加速度计数据的条件下,也能达到cm

级定轨精度,完全可以满足我国未来多类卫星计划对精密定轨的需求。同时由于能联合处理地面GPS数据、星载GPS数据和星载加速度数据,实现低轨卫星的动力学定轨,为后续卫星轨道参数和地球重力场模型球谐系数的联合求解奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Geo Forschungs Zentrum Potsdam. Announcement of Opportunity for CHAMP[OL]. <http://op.gfz-potsdam.de/champ/>, 2001
- [2] Reigber C, Schwintzer P, Neumayer K H, et al. The CHAMP only Earth Gravity Field Model EIGEN-2[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(8): 1 883-1 888
- [3] 赵齐乐. GPS 导航星座及低轨卫星的精密定轨理论和软件研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
- [4] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. 用 PANDA 对 GPS 和 CHAMP 卫星精密定轨[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2): 113-116
- [5] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998
- [6] LEO Pilot Project of the IGS. IGS LEO CHAMP Orbit Comparisons[OL]. http://nng.esoc.esa.de/gps/CH_cmp.html, 2002

第一作者简介: 赵齐乐, 博士, 讲师。现主要从事卫星大地测量及卫星精密定轨研究。

E-mail: zhaohl@whu.edu.cn

Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite with cm-level Accuracy

ZHAO Qile¹ LIU Jingnan^{1,2} GE Maorong¹ SHI Chuang¹

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

(2 Presidential Secretariat, Wuhan University, Luojia Hill, Wuhan 430072, China)

Abstract: The precision orbit determination of CHAMP satellite was done through PANDA (position and navigation data analyze) software, using the onboard GPS data from day 126 to 131 of year 2002. The orbit accuracy is assessed by analyzing the difference from GFZ precision orbits, the data residuals and the satellite laser ranging (SLR) residuals. The comparison results show that the accuracy of the orbits obtained is 4~5 cm in radial and 6~8 cm along and across the track.

Key words: precision orbit determination; CHAMP satellite; onboard GPS data