

利用 CHAMP 卫星星历恢复引力位模型的模拟研究

许厚泽¹ 沈云中²

(1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉市徐东路 54 号, 430077)
(2 同济大学测量与土地信息工程系, 上海市四平路 1239 号, 210094)

摘要: 对 CHAMP 卫星星历恢复引力位模型的精度, 使用 3 种方法和不同积分弧长作了模拟计算, 结果表明, 采用正则化方法并扩展积分弧长将有助于提高解算位系数的精度, 预期 CHAMP 卫星观测将使现有引力位模型低阶位系数的精度提高 1~2 个数量级。

关键词: CHAMP 卫星; 地球重力场模型; 正则化解法
中图法分类号: P228.41; P226.1

1 基本原理

CHAMP 卫星是利用高低卫-卫跟踪方式以确定低阶重力位系数的重力卫星, 安装有星载 GPS 接收机用以精确确定卫星的轨道, 同时在卫星质心处安装加速度计, 用以实时测定卫星所受到的非保守力的摄动影响, 从而分离出保守力项导致的摄动保守力。而保守力摄动中, 固体潮、海潮等影响可以精确的模型予以顾及, 以分离出引力位的摄动影响, 并据此修正地球的引力位模型。

根据已知卫星星历确定引力位模型的观测方程可表示为:

$$\Delta X(t_k) = Y(t_k) \delta u \quad (1)$$

式中, ΔX 为受扰动的 CHAMP 卫星星历; $Y(t_k)$ 由以下变分方程确定:

$$\dot{Y}(t) = [H(X(t)) + a_X(t)] Y(t) + a_X(t) Y(t) + B(X(t)) \quad (2)$$

$$H = \frac{\partial \text{Grad } V_0}{\partial X^T}, B = \frac{\partial \text{Grad } V_0}{\partial u_0^T} \quad (3)$$

起始值为:

$$Y(t_0) = 0, \dot{Y}(t_0) = 0$$

式中, δu 为引力位系数的改正; a_X, \dot{a}_X 为摄动加速度对位置及速度的导数; V_0 为起始引力位。

2 数学模型及求解

求解上述观测方程, 涉及方程的不适定问题。为了比较方法的优劣, 笔者采用 3 种数学解法: ①最小二乘解; ②用 Kaula 准则作为约束的正则化解法; ③用滤波因子的正则化解法。其中,

1) CHAMP 轨道模拟的起始轨道参数值采用:

$$a = 6842\text{m}, e = 0, i = 87^\circ, \Omega = 18^\circ 30', \omega = 90^\circ, M = 0$$

2) 参考引力位模型选用 EGM96 模型。

3) 轨道由 20s 间隔作数值积分产生。

4) 模拟 CHAMP 轨道的偶然误差选取如下:

①取每 20s 的抽样星历; ②模拟轨道 3 个方向中每一个的相对误差为 5mm; ③相邻误差的相关性为 0.2; ④据此, 45min 后误差积累约为 12cm。

5) 积分弧长分别选为 20s、60s 及 120s。

6) 反演的引力位系数到 54 阶。

图 1 给出 CHAMP 卫星 1d 轨道的地面轨迹。

3 模拟结果及结论

模拟计算首先用 EGM96 引力位模型以及选定的轨道起始值及速度 (CHAMP 卫星的速度约

8km/s, 轨道周期约 94min), 并附加上轨道的偶然误差(各分量相对误差 5mm, 相邻误差相关性 0.2), 计算出模拟轨道。然后根据此模型轨道值再按方程(1)~(3)反解出位系数值及其均方根误差, 把解算的位系数数值与起始 EGM96 之差作为恢复位系数的误差。

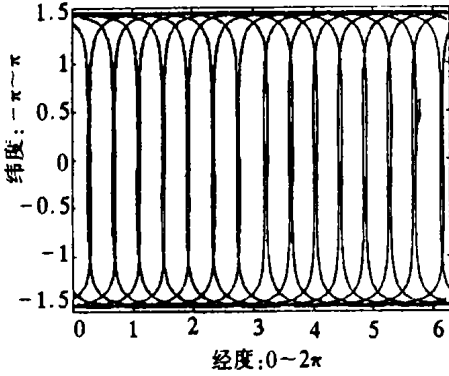


图1 1d CHAMP 轨道的地面轨迹

Fig.1 The Ground Track of CHAMP Orbit in One Day

图2~图4分别为利用 5d 轨道, 60s 积分弧长及 3 种解算方法所得到的模拟结果。

各图中横坐标表示球谐展开的阶, 上图的纵坐标为恢复位系数的误差(与 EGM96 之差), 下图的纵坐标为解算求得的均方根误差。比较图 2、图 3、图 4 可见: ①3 种方法恢复位系数的精

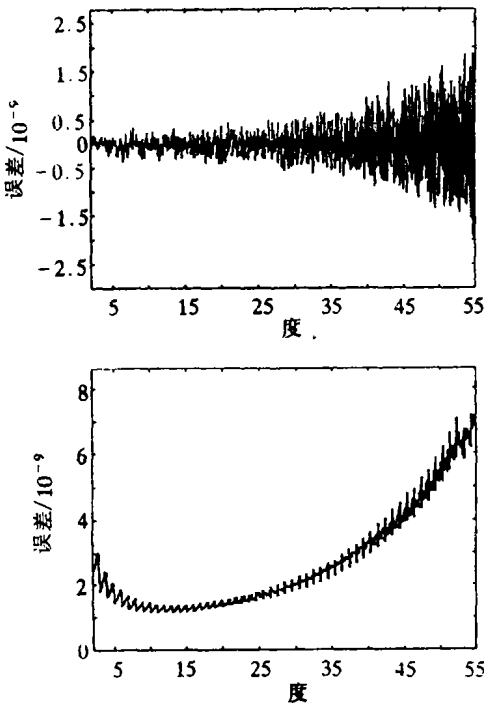


图2 最小二乘法解算结果

Fig.2 Result by Least Square Solution

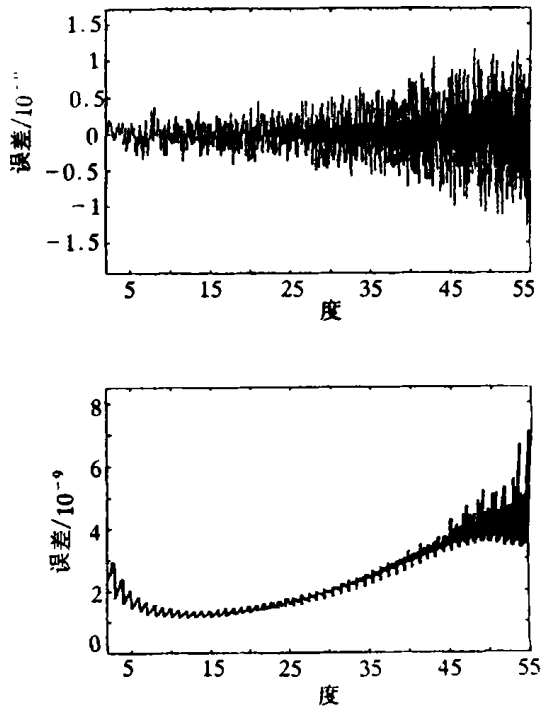


图3 Kaula 准则约束结果

Fig.3 Constraint Result by Kaula Rule

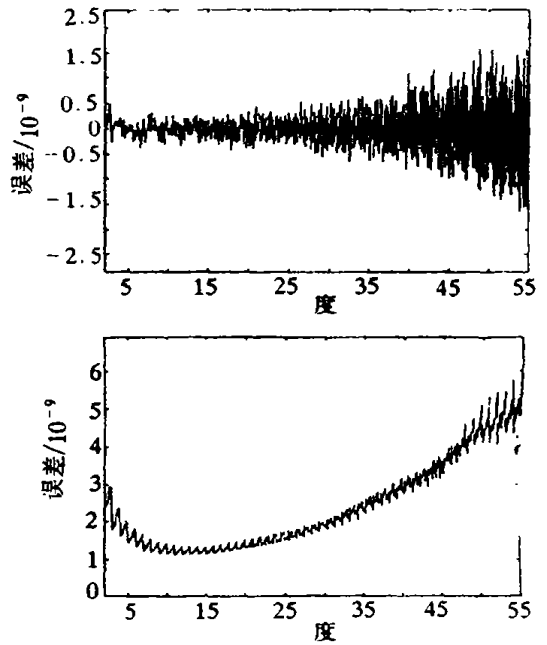


图4 滤波因子正则化结果

Fig.4 Regularization Result by Filtering Factor

度都约为 10^{-9} ; ②对低于 36 阶的位系数, 3 种解法几乎有相同的精度, 对高于 36 阶的位系数, 采用正则化的方法将使精度提高 20%左右; ③随着位系数阶数的增大, 同样利用 5d 轨道, 把积分弧长增大为 120s, 所得结果示于图 5(仅列出最小二乘法的解)。由图可见, 在积分弧长扩展为 120s 后, 低阶位系数精度得到改善, 低于 36 阶的位系

数精度将可提高到 1×10^{-9} ; 但对 54 阶位系数, 最大误差约为 7×10^{-9} , 改善不大。

为了考察轨道长度的影响, 对 20s 积分弧长取不同轨道长度的结果进行比较, 结果示于图 6。其中, 上图为 5d 轨道长度, 下图为 30d 轨道长度。

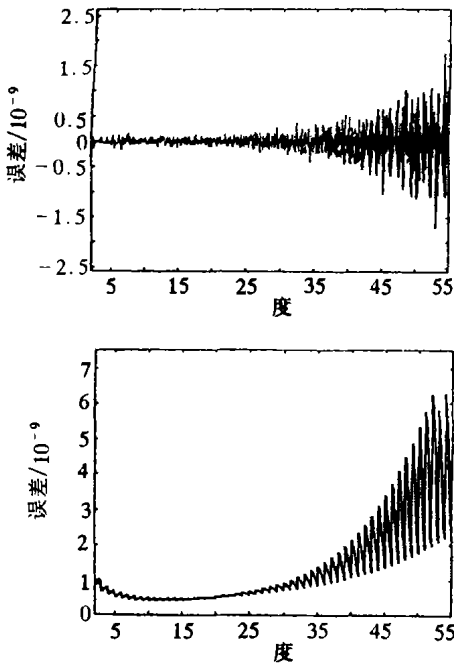


图 5 积分弧长延长为 120s 的最小二乘解算结果
Fig. 5 Least Square Solution with the 120s Integration Arc

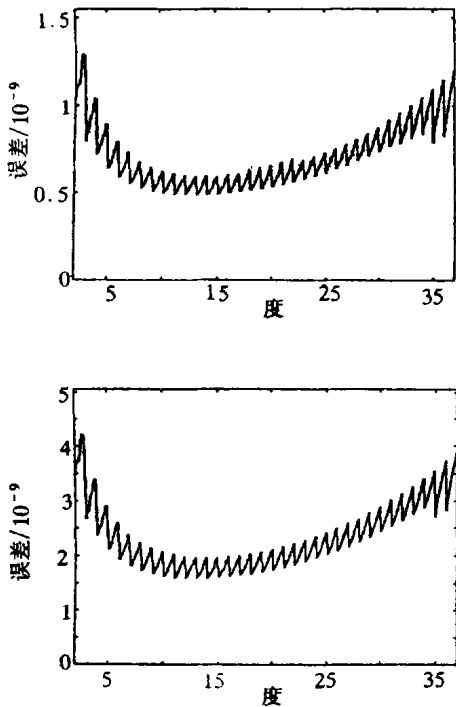


图 6 轨道长度延长到 30d 的解算结果
Fig. 6 Solution with the 30d Orbit Arc

二者相比, 精度改善大致为 $\sqrt{6}$ 倍, 与误差传播定律相符。据此推算, 若取 120s 积分弧长, 1 个月轨道长度作积分, 低于 36 阶和 36~54 阶的位系数精度将分别达到 4×10^{-10} 和 3×10^{-9} , 而对整个 CHAMP 卫星 5a 寿命的资料进行处理, 低于 36 阶位系数精度预计可达到 10^{-11} 。

4 结 语

通过以上模拟计算, 对 CHAMP 卫星观测恢复重力场的能力, 取得以下一些初步看法。

- 1) 根据 Kaula 准则作平滑约束和根据最优滤波因子的正则化方法都能改善待解位系数的精度, 尤其是对高阶项;
- 2) 把积分弧长由 60s 扩展到 120s, 能改善低阶位系数的精度, 但随着阶数接近 54, 改善不大。
- 3) 如果本文所作 CHAMP 的轨道误差模拟正确, 用 5a CHAMP 资料求解低于 36 阶引力位模型, 有望达到 10^{-11} 的精度。

参 考 文 献

- 1 沈云中. 利用 CHAMP 卫星星历精化地球重力场模型的研究: [学位论文]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2000
- 2 陆 洋. 利用卫星测高数据改善地球重力场模型的研究: [学位论文]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 1997
- 3 Wakker K F. Recovery of Gravity Anomalies and Geoid on a Regional Basis from a SST (GPS). Final Report, ESA Contract No. 8153/88/ F/ FL, Holand, 1990
- 4 Bouman J, Koop R. Stabilization of Global Gravity Field Solutions by Combining Satellite Gradiometry and Airborne Gravimetry. DEOS Progress Letter 98. 1, 1998. 43 ~ 55
- 5 Hsu H T, Lu Y. Regional Geopotential Model in China, Bollietine DiGeosia e Science Affini, N. 2, Italy, 1995. 161~175
- 6 Iik K. Regional Gravity Field Recovery from SST (GPS-Aristoteles). In: Study on Precise Gravity. Field Determination Methods and Mission Requirements. Final Report, ESA Contract No. 8153/88/ F/ FL, Holand, 1990
- 7 Tikhonov A N. Numerical Methods for the Solution of Ill-posed Problems. Kiuwer Academic Publishers 1995

作者简介: 许厚泽, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士。现主要从事大地测量学及地球重力场研究。
E-mail: hshuh@asch.whigg.ac.cn

Simulation of Recovering Gravitational Potential Model from the Ephemerides of CHAMP

XU Houze¹ SHEN Yunzhong²

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 54 Xudong Road, Wuhan, China, 430077)

(2 Dept. of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road Shanghai, China, 210094)

Abstract: Three methods with different arc length of integration are tested in this simulation to recover gravitational potential model from the ephemerides of CHAMP. The results show that the regularized method with suitable arc length of integration will improve the precision of recovering gravitational potential model. The precision of low degree harmonic coefficients from CHAMP observations is expected 1~2 magnitude better than any current gravitational potential model.

Key words: CHAMP; gravitational potential model; regularized method

About the author: XU Houze, researcher, Ph. D. supervisor, member of the Chinese Academy of Science. He is engaged in research work in the field of Geodesy and Geophysics.

E-mail: hsu@asch.whigg.ac.cn

(上接第 474 页)

- 11 李建成, 宁津生. 局部大地水准面精化的理论和方法. 测绘学报, 1999(专辑)
- 12 宁津生, 罗志才. 卫星跟踪卫星技术的进展及应用前景. 测绘科学, 2000(4)
- 13 宁津生, 管泽霖. WDM94 360 阶地球重力场模型的研究. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(4): 283~291
- 14 宁津生. 地球重力场模型及其应用. 冶金测绘, 1994(2)
- 15 Ning J S. The Determination of Relative Geoid Height

by Least Squares Collocation. Calgary, Alberta, Canada Publication 60003 1985

- 16 Günter Seeber. Satellite Geodesy. Berlin; de Gruyter, 1993
- 17 Li J C, Chao D B. Spherical Cap Harmonic Expansion for Local Gravity Field Representation. Manuscripta Geodaetica 1995

作者简介: 宁津生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现主要从事物理大地测量的研究。代表成果有我国地球重力场模型研制和大地水准面的精化等。

E-mail: jsning@wtums.edu.cn

Following the Developments of the World, Devoting to the Study on the Earth Gravity Field

NING Jingsheng¹

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

Abstract: The study of the theories and methods of the earth gravity field by the author and his colleagues follows the developments of the world, and the research results with theoretical significance and practical value are systematically described to the point.

Key words: earth gravity field; earth gravity field model; quasi-geoid; satellite gravity surveying technology

About the author: Ning Jingsheng, professor, Ph. D. supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. His interested fields are physical geodesy. His typical achievements are the development of the earth gravity field model and geoid refining of China, etc.

E-mail: jsning@wtums.edu.cn