

张子占, 陆 洋, 许厚泽. GRACE 和 SLR 观测的地球动力学扁率最大熵谱及小波相关分析. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1383 ~ 1389

Zhang Z Z, Lu Y, Xsu H Z. Maximum entropy spectral analysis and wavelet coherence analysis of the dynamic ellipticity of the earth from GRACE and SLR measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1383 ~ 1389

GRACE 和 SLR 观测的地球动力学扁率 最大熵谱及小波相关分析

张子占^{1,2}, 陆 洋¹, 许厚泽¹

1 中国科学院测量与地球物理研究所 动力大地测量重点实验室, 武汉 430077

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 卫星重力测量技术的实现为测定地球动力学扁率提供了新的方式和途径, GRACE 卫星是目前最新的重力测量卫星, 据其恢复的低阶重力场较以往精度得到大大提高, 然而其观测地球动力学扁率(二阶项)却与卫星激光测距(SLR)结果相差较大. 本文采用最大熵谱和小波分析方法对 GRACE 和 SLR 观测的地球动力学扁率时间序列信号进行定量比较分析, 结果表明: GRACE 观测的地球动力学扁率年际周期变化振幅仅为 SLR 观测结果的 25%, 并且目前 GRACE 观测的地球动力学扁率数据中含有系统输入信息和相位差, 但前者较后者包含有较强的短周期(2~6 月)信息. 造成这种差异的主要原因可能来自于 GRACE 与 SLR 全球观测数据时空分布不同.

关键词 GRACE, 卫星激光测距, 地球动力学扁率, 最大熵谱分析, 小波分析

文章编号 0001-5733(2007)05-1383-07 中图分类号 P228 收稿日期 2007-01-12, 2007-05-20 收修定稿

Maximum entropy spectral analysis and wavelet coherence analysis of the dynamic ellipticity of the earth from GRACE and SLR measurements

ZHANG Zi-Zhan^{1,2}, LU Yang¹, XSU Hou-Ze¹

1 Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the advent of the satellite gravity measurements, this new technique which is different from Satellite Laser Ranging (SLR) provides a new approach to determine the Earth's Dynamic Ellipticity (EDE). The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) is the latest satellite gravity mission, the accuracy of low degree Stokes coefficients of the gravity field models derived from GRACE has been greatly improved. However, the results of EDE from GRACE do not agree well with that from SLR measurements. In this paper, the maximum entropy spectral analysis and wavelet analysis are used to assess the data sets EDE from GRACE and SLR. The results show that the interannual amplitude of the EDE signal from GRACE is only 25% of that from SLR, and GRACE EDE signals contain inputted system information and great phase difference, but the former reveals stronger short-term (2~6 months) signals than the later. These differences might be caused by the un-synchronism of the global measurements from GRACE and SLR.

Keywords GRACE, Satellite Laser Ranging, The Earth's Dynamic Ellipticity (EDE), Maximum entropy spectral analysis, Wavelet analysis

基金项目 国家自然科学基金(40234039)和国家 863 计划(2006AA12Z128)项目共同资助.

作者简介 张子占,男,1979 年生,博士研究生,主要从事测高/重力数据同化方面的研究. E-mail: zhang@asch.whigg.ac.cn

1 引言

地球动力学扁率在天文学和地球物理学研究及应用中具有重要意义.在天文学研究中,地球动力学扁率与黄经日月岁差相联系,刚体地球章动的振幅和非刚体地球的转换函数都依赖于它^[1].

在地球物理学研究中,地球系统的质量迁移和重新分布一直是地球物理学者关心和研究的一个热点和难点,任何一种物质重新分布现象都会引起地球形状的变化,而地球重力场的变化是表征这种形变的重要物理量,更重要的是重力场的变化可以通过空间测量技术来确定.地球系统中的大气、海洋、陆地水和冰等的运动及相互作用对 J_2 有明显影响^[2-4],反过来,我们可以根据 J_2 的异常变化来研究地球系统的某些变化.此外,由 J_2 导致的卫星轨道摄动会引起轨道平面的进动.

在专题卫星重力观测技术实现以前,重力场的变化主要通过卫星激光测距 (SLR)、甚长基线干涉测量 (VLBI)、全球定位系统 (GPS) 和卫星测高等空间大地测量技术实现,其中精度最高的是对地球动力学扁率 (J_2) 的测量.随着新一代重力卫星的出现,重力场的中长波部分的精度得到极大提高,这为研究地球形状的变化及地球系统的物质迁移提供了新的方式和手段^[5-9]. GRACE 重力卫星是一个低低卫-卫跟踪测量系统,据此恢复的重力场低阶部分较以往精度提高了一两个量级^[5],可二阶项(动力学扁率)却与 SLR 观测结果相差较大,对此,目前国内外尚未见到很好的解释.本文采用现代谱估计方法对 GRACE 和 SLR 观测的 J_2 时间序列进行定量比较分析,并尝试对二者差异进行解释.

2 数据来源

2.1 GRACE 重力卫星数据

GRACE 卫星是由美国 (NASA) 和德国 (GFZ) 联合研发的低低卫-卫跟踪重力卫星,轨道高度约为 500 km,主要用于探测重力场和全球气候变化,研究洋流、海水热量交换、海底压力变化和监测海洋物质运动及陆地雨雪储量变化等^[6].采用的低低卫-卫跟踪系统和 K 波段精确测距保证了测量数据的高精度,GRACE 卫星数据不仅精度非常高而且具有覆盖全球、分辨率高等以往卫星无法达到的优点^[5-9].

2.2 SLR 卫星数据

目前,地球的外围有多颗激光地球动力学卫星在工作,为精确测定地球动力学扁率 J_2 及其变化做出了重大贡献.其中, LAGEOS⁻ 和 LAGEOS⁺ 分别是由美国 NASA 于 1976 年以及和意大利合作于 1992 年发射的高轨激光地球动力学卫星,轨道高度约为 6000 km,其目的是用来研究地球自转、板块运动、由于地球惯性张量变化引起的重力场变化、地球质心变化以及地球动力学扁率的长期变化^[4]. Starlette 和 Stella 是由法国宇航局分别于 1975 年和 1993 年发射的两颗低轨激光卫星,轨道高度约为 800 km,任务是测定地球引力场的周期变化和长期变化.这四颗卫星的共同特点是面积质量比小,所受大气阻力和对非引力摄动的敏感度低. Ajisai 则是日本于 1986 年发射的用于大地测量的激光和摄影卫星,轨道高度为 1500 km^[4].

3 数据分析

3.1 数据预处理

本工作中我们采用了 Texas 大学空间研究中心 (UTCSR) 分别根据 SLR 和 GRACE 观测数据解算的 C_{20} (重力场二阶带谐项系数) 值,其中 SLR 数据主要来自 2.2 节中所述五颗激光地球动力学卫星,时间跨度为 2002 年 4 月至 2006 年 5 月. GRACE 时间序列跨度与 SLR 数据相同,对于个别间断的 C_{20} ,采用样条插值生成.这些数据都进行了固体潮、海潮、大气、海面气压变化、极潮等相应改正^[1].根据 C_{20} 与 J_2 的关系,可将 C_{20} 转化为地球动力学扁率 J_2 .图 1a 给出了根据 SLR 和 GRACE 观测数据分别解算的地球动力学扁率 J_2 时间序列.为了提高谱分辨率和数据处理方便,我们对两组地球动力学扁率时间序列数据进行标准化处理(图 1b),使其尽可能具有平稳时间序列信号的特征.比较两组 J_2 序列,可以看出两者符合时好时坏(如在 2003 年期间及 2005 年期间,二者吻合较好,而在其他时间段上,两者符合则较差),但不能直接看出它们之间的相互关系,需借助相应的分析工具.在 2004 年期间 GRACE 的轨道受到调整,造成其观测的 J_2 序列发生较大的跳跃,后述分析表明这些跳跃没有对整体分析产生严重影响.

1) 重力场二级产品用户手册, <http://www.csr.utexas.edu/grace>

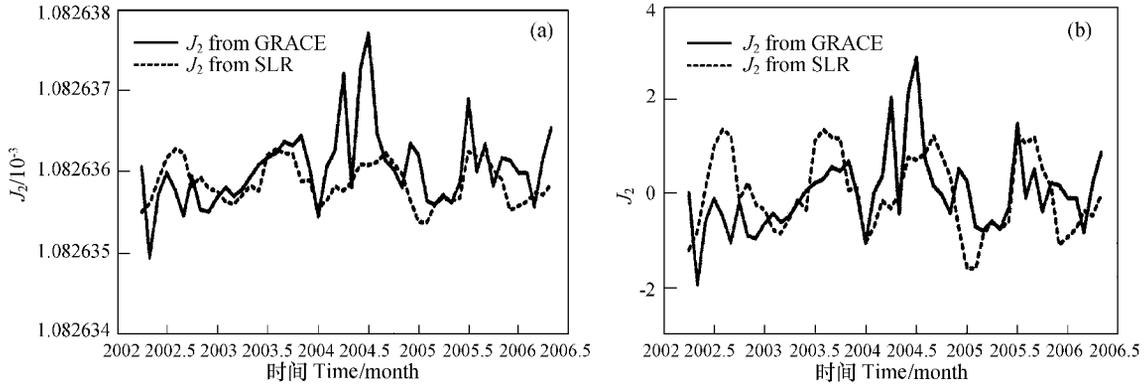


图 1 J_2 原数据 (a) 和标准化后的时间序列 (b)

(实线—GRACE 观测数据; 虚线—SLR 观测数据)

Fig. 1 The original data of J_2 (a) and the normalized J_2 (b)

(The real line denotes the J_2 data from GRACE measurements, the dot line denotes the J_2 data from SLR measurements)

3.2 最大熵谱分析

经典的谱分析方法都是以傅里叶变换为基础, 它适合于对信号在时域和空域上进行整体分析, 而实际的测量数据资料总是有限的, 对无限长信号进行截断得到长度有限的测量数据, 其频谱的截断效应将导致谱峰加宽和频谱泄漏, 数据记录长度较短时, 谱分辨率则更低^[10,11].

最大熵谱分析方法是 20 世纪 60 年代末发展起来的一种谱分析方法. 熵是信息论中信息量大小的量度, 有具体的物理含义, 在随机过程中它也可以用来衡量一个过程的随机性的强弱, 随机性最强的序列其谱熵也最大. 最大熵谱分析的基本思想是对所测量的有限数据以外的数据不作任何确定性的假

设, 而是在信息熵为最大的前提下, 将未知的相关函数用迭代方法递推出来^[10], 也就是说满足“熵”最大的谱估计是自回归 (AR) 模型的谱. 理论分析和实验结果都表明, 用最大熵谱分析方法可得到分辨率很高的、平滑的功率谱估计值, 特别是在数据时间序列较短时, 可以得到比传统的方法更为符合实际的功率谱估计值^[11-14].

对应时间序列信号每个频率 ω 的自回归谱密度计算公式为

$$P(\omega) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^M a_k e^{-i\omega k} \right|^2}, \quad (1)$$

式中 a_k 、 σ^2 分别是 M 阶 AR 模型的自回归系数和相

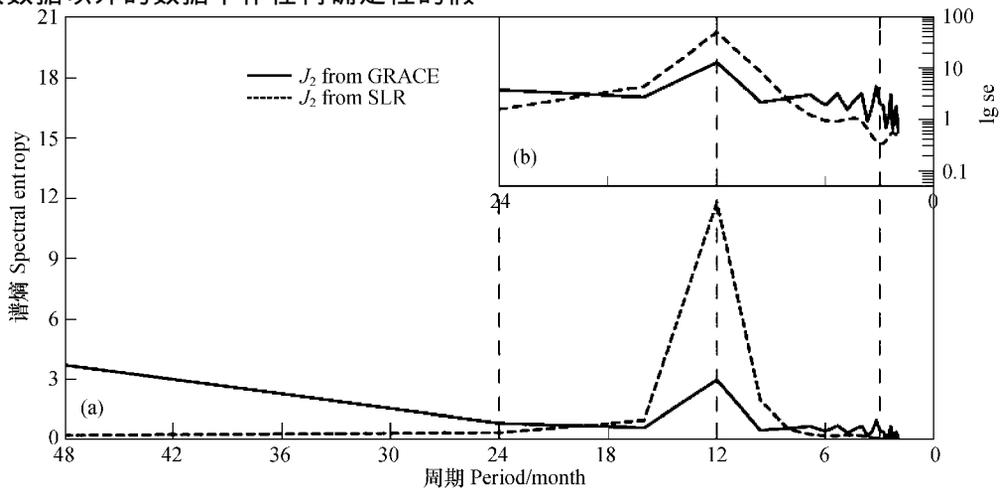


图 2 J_2 的最大熵谱图 (a) 及对数最大熵谱图 (b)

(实线—GRACE 谱线, 虚线—SLR 谱线, lgse 为对数熵)

Fig. 2 The spectral entropy of J_2 (a) and the logarithmic spectral entropy of J_2 (b)

(The real line denotes the J_2 data from GRACE measurements, the dot line denotes the J_2 data from SLR measurements, lgse denotes the logarithm entropy)

应的残差均方差. 这样阶数 M 的选择就至关重要, 阶数过大会出现“增频”(出现虚假频谱), 而过小则会造成“蚀频”(漏掉某些频谱). 根据文献[10,13]的建议, 当数据序列较短时, 模型阶数 M 不超过数据长度的一半, 谱估计稳定性较好. 结合最大熵准则和实际试验, 这里我们取 $M = 24$. 图 2 分别给出了 J_2 的最大熵谱图(图 2a)和对数放大熵谱图(图 2b). 图中实线表示根据 GRACE 数据解算的 J_2 序列的最大熵谱, 虚线为根据 SLR 数据解算的 J_2 序列的最大熵谱.

从图 2 中可以看到基于 GRACE 重力卫星和 SLR 观测资料解算的 J_2 序列都揭示了动力学扁率短期变化的部分特征. 共同点是两者都表现出动力学扁率较强的年际周期特征, 但是二者之间存在较大差异. 其差异主要体现为: (1) 在年际尺度上, GRACE 观测的 J_2 序列的谱熵远小于 SLR 观测的 J_2 序列之谱熵, 前者仅为后者的 25%; (2) 在 2~6 个月短周期尺度上, GRACE 观测的 J_2 序列存在较明显的短周期信号, 其中季节(3 个月)信号相对较强, 而 SLR 观测的 J_2 序列显示的短周期信号振幅要非常微弱, 且季节周期振幅最小; (3) 在长于年际周期尺度上, GRACE 观测的 J_2 序列谱线呈上升趋势, 而 SLR 观测的 J_2 序列接近于零, 这表明 GRACE 观测的 J_2 序列中含有系统输入信息.

根据最大熵谱的原理可知, 最大熵谱方法可以

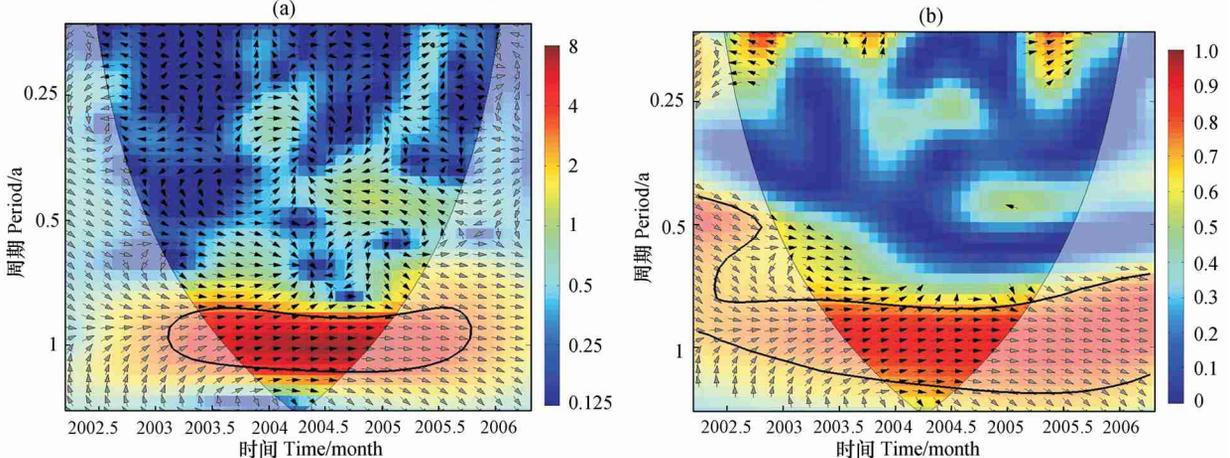


图 3 GRACE 和 SLR 观测的 J_2 序列的小波交叉谱 (a) 和小波相关谱 (b)

图中粗黑等值线表示考虑置信水平大于 5% 的有色噪声模型, 细黑线为信号边界影响锥形曲线. 矢量箭头表示两组信号的相位关系, 箭头向右表示相位一致, 箭头向左表示相位相反, 箭头垂直向下表示 SLR 观测的 J_2 相位超前 GRACE 观测结果 90°.

Fig. 3 The cross-wavelet power (a) and the wavelet coherency and phase between the two J_2 series from GRACE and SLR

The thick black line is the 5% significance level using the red noise model, and the thin black line indicates the cone of influence.

The relative phase relationship is shown as arrows with in-phase pointing right and anti-phase pointing left, an arrow pointing vertically downward means that J_2 from SLR leads GRACE 90°.

尽可能减小噪声信号, 信号的部分突变不会对整个时间序列信号造成根本性的影响, 因此从图 2 中还可以看出, GRACE 的轨道调整引起的 J_2 序列的突变没有对其熵谱造成周期错位等后果.

3.3 小波相关性分析

小波变换因具有较好的时频局部化分析功能, 被广泛应用于信号的频谱分析. 设离散时间信号序列为 $x_n (n = 1, 2, \dots, N)$, 则其小波变换可定义为^[15,16]

$$W_n^x(s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x_n(t) \psi_0\left(\frac{t-n}{s}\right) dt, \quad (2)$$

这里 t 表示信号的抽样间隔, s 为小波变换尺度, ψ_0 为小波函数, 本文取为 Morlet 函数. 设另一离散时间信号序列为 $y_n (n = 1, 2, \dots, N)$, 小波变换为 $W_n^y(s)$, 其共轭变换为 $W_n^{y*}(s)$, 则两组信号的小波交叉谱定义为^[15,16]

$$W_n^{xy}(s) = W_n^x(s) W_n^{y*}(s), \quad (3)$$

两组信号的小波相关谱可定义为

$$R_n^2(s) = \frac{|s^{-1} W_n^{xy}(s)|^2}{s^{-1} |W_n^x(s)|^2 s^{-1} |W_n^y(s)|^2}, \quad (4)$$

式中 \cdot 表示在时间域和变换尺度上进行平滑滤波.

小波交叉谱可揭示两组时间信号序列的具有较高共同谱能量的时频部分, 且能揭示信号间的相位关系. 如果两组信号是物理相关的, 则它们的相位一致或者相差很小, 其相位关系可用相位角的圆域平

均值来量化. 小波相关谱则揭示两组时间信号序列的时频相关性, 并且可揭示信号间的局部失锁现象. 交叉谱和相关谱的置信水平可采用蒙特卡罗方法计算^[17,18].

从图 3 可看出, 两组 J_2 数据主要在年周期上具有较强的交叉谱和相关谱, 且相位基本一致, 而在其他周期上, 考虑置信水平大于 5% 的有色噪声模型时, 交叉谱和相关谱几乎不存在. 原因在于: 由 3.1 节中的分析可知, SLR 观测序列短周期信号非常弱, 因此它与 GRACE 观测序列的交叉谱和相关谱也较弱, 二者的年周期相对较强, 则其交叉谱和相关谱也较强.

4 讨论

造成基于 GRACE 重力卫星和 SLR 观测资料解算的 J_2 序列之间周期、振幅和相位差异的原因可能来自以下几个方面: 首先, GRACE 观测轨迹的空间分布有问题, 或者据其观测数据解算 J_2 项所采用方法有缺陷; 其次, GRACE 重力卫星与激光测距卫星对重力场低频信号的敏感程度不同; 再者, 对两种方式提供的观测数据所做的地球物理改正项精度或者模型不完全相同.

图 4 为 LAGEOS 激光卫星系统示意图. 图中所示 LAGEOS-I 和 LAGEOS-II 的倾角分别为 109° 和 52° , 它们的大小、重量和轨道都相同, 只是倾角和交点周期不同, 构成两颗孪生卫星. 与之类似, Starlette 和 Stella 也是一对孪生卫星^[4]. 这样地面 SLR 站可以从不同角度、不同地点跟踪这些激光卫星. 另一方面, 随着美国 NASA/GSFC SLR-2000 计划的实施, SLR 的地面观测站逐步实现自动化跟踪, 单发射的测距精度达到 1 cm 或者更高, 更主要的是可以提供 24 小时的跟踪覆盖, 这使得 SLR 观测的空间分布和时间分布更加合理化^[4]. SLR 技术的这些优点使我们可以获得较合理的观测数据, 从而以较高的精度测定地球低阶重力场模型及其时空变化. 图 5 为 GRACE 重力卫星系统示意图. 图中所示 GRACE 观测系统是由两颗平行飞行的卫星 (AB) 组成, AB 的轨道由高轨的 GPS 确定, 当 AB 飞过质量异常体的上空时, AB 间的距离会发生变化并由星间微波测距精密测定. GRACE 的轨道为近极轨道, 需要大约 30 天的时间覆盖满全球^[5,7,8]. 正是这样的设计系统使得测定重力场中长波的精度大大提高, 但其全球观测点的时空分布是不相同的. 本文认为 GRACE 全球

观测点的空间分布和时间分布不如 SLR 优化是造成据其解算的地球动力学扁率与 SLR 结果不相符合的主要原因.

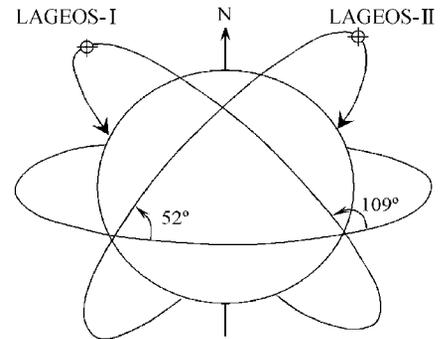


图 4 激光卫星系统示意图

Fig. 4 Sketch map of the SLR system

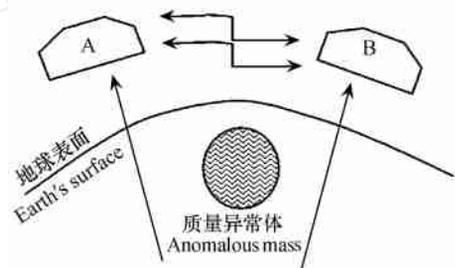


图 5 GRACE 重力卫星系统示意图

Fig. 5 Sketch map of the GRACE system

从理论上可以知道, 卫星轨道越高, 卫星受重力场的摄动越小. 相对于 GRACE 卫星的轨道高度, 激光测距卫星的轨道高度要高得多, 因此 SLR 观测的 J_2 对短周期 (小于年际) 的信号不敏感. 研究^[19~22]表明: 利用 GRACE 恢复的低阶重力场 (不含二阶项) 可以较好地揭示地球表层系统的质量分布变化 (如陆地水储量、冰川融化等). 目前, 对两种方式观测数据所做的各项地球物理 (固体潮、海潮、海面气压变化、极潮等) 改正模型精度已相对较高, 即使有所差异, 其影响也相对较小. 此外, 由于 GRACE 卫星的轨道较低, 且是近极轨道, 对反映全球包括近极处的物质迁移更为敏感, 以致据其计算重力场中的二阶位系数 C_{20} 、 C_{21} 、 S_{21} 等项都随时间变化, 而由 SLR 观测的卫星与之相比就显得不足, 且 SLR 站大多数分布在中低纬度附近. 虽然在利用 SLR 解算重力场二阶系数时一般缺失 C_{21} 、 S_{21} 等项, 而且大气潮汐对 GRACE 卫星的影响较 SLR 卫星大, 但这些偏差不可能引起 GRACE 观测 J_2 项的系统偏差. 原因在于相对于 C_{20} 之值, C_{21} 、 S_{21} 等项要小 2~6 个量级, 同时在利用 GRACE 卫星和 SLR 观测资料解算 J_2 项时都

进行了相关改正.

5 结 论

本文通过采用最大熵谱分析和小波相关分析方法对 GRACE 重力卫星和 SLR 分别确定的 J_2 时间序列信号进行定量比较分析,发现 GRACE 重力卫星观测的 J_2 时间序列信号中的年周期信号振幅较 SLR 观测值明显偏小,但前者却显示了一定的短周期(2~6个月)信号,年际周期相位基本一致.两组观测序列在短周期上有较大的相位差,大于年际周期的信号含有系统偏差.通过对 GRACE 重力卫星和 SLR 观测的原理及其实现进行比较分析,本文认为这两种观测技术提供的观测数据的全球时空分布差异是导致对地球动力学扁率观测差异的最有可能的主要原因.

自从 2002 年 GRACE 卫星发射以来,众多的研究已证明其监测地球系统大尺度物质迁移的能力.这些研究中对 GRACE 卫星资料恢复的重力场二阶项系数(C_{20})的处理方法大致有两种:一种是不考虑二阶项变化的影响;另一种是直接利用卫星激光测距结果来代替.实际上相对激光地球动力学卫星的轨道来说,GRACE 重力卫星的轨道要低得多,对地球重力场的低频信号更为敏感,这从上述谱估计中也可看出,而这些低频信息对于研究地球系统的短期变化具有重要意义.因此,上述两种处理方法都会丢失一定的信息,如何从这两种不同来源的数据提取更有价值的信息,对此还需要进一步深入研究.

致 谢 感谢 Texas 大学空间研究中心(UTCSR)提供数据.

参考文献(References)

- [1] 夏一飞. 地球动力学扁率及其与岁差章动的关系. 天文学进展, 2000, 18(4):283~292
Xia Y F. The earth dynamical flattening and its relation to precession and nutation. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 2000, 18(4): 283~292
- [2] 胡小工, JianLi CHEN, 黄 斌等. 非潮汐海洋运动对地球动力学扁率变化的贡献. 地球物理学报, 2004, 47(3): 428~432
Hu X G, J L Chen, Huang C, et al. Non-tidal oceanic contribution to the variation of the Earth oblateness. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3): 428~432
- [3] 彭碧波, 吴 斌, 许厚泽. 低阶地球引力场长期变化的确定. 测绘学报, 2005, 29(增刊): 38~41
Peng B B, Wu B, Xu H Z. Determination of long term variations of low degree geopotential field. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2005, 29(Suppl.): 38~41
- [4] 胡名诚. 现代大地测量学的理论及其应用. 北京:测绘出版社, 2003. 250~253
Hu M C. The Theory and the Application of Contemporary Geodesy (in Chinese). Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003. 250~253
- [5] Tapley B D, Bettadqur S. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophysics Research Letter*, 2004, 31:L09607
- [6] 许厚泽. 卫星重力研究: 21 世纪大地测量研究的新热点. 测绘科学, 2001, 26(3): 1~3
Hsu H Z. Satellite gravity missions: new hotpoint in geodesy. *Science of Surveying and Mapping* (in Chinese), 2001, 26(3):1~3
- [7] 许厚泽, 周旭华, 彭碧波. 卫星重力测量. 地理空间信息, 2005, 3(1): 1~3
Xu H Z, Zhou X H, Peng B B. Satellite gravity measurement. *Geospatial Information* (in Chinese), 2005, 3(1): 1~3
- [8] 宁津生. 卫星重力探测技术与地球重力场研究. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 1~5
Ning J S. The satellite gravity surveying technology and research of Earth's gravity field. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2002, 22(1): 1~5
- [9] 周旭华, 许厚泽, 吴 斌等. 用 GRACE 卫星跟踪数据反演地球重力场. 地球物理学报, 2006, 49(3): 718~723
Zhou X H, Hsu H, Wu B, et al. Earth's gravity field derived from GRACE satellite tracking data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 718~723
- [10] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理. 北京:气象出版社, 1998. 160~168
Ding Y G, Jiang Z H. The Time Signal Series Processing of the Meteorology Data (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1998. 160~168
- [11] 聂士忠, 王玉泰. 最大熵谱分析方法和 MATLAB 中对短记录资料的谱分析. 山东师范大学学报(自然科学版), 2005, 20(3):40~41
Nie S Z, Wang Y T. The maximum entropy spectral analysis and its application in a short-length data series based on MATLAB. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)* (in Chinese), 2005, 20(3):40~41
- [12] 吉培荣, 何振亚. 具有先验估计的最大熵谱估计. 武汉水利电力大学学报, 1997, 19(2): 50~54
Ji P R, He Z Y. Maximum entropy spectral analysis with prior estimation. *Journal of University of Hydrological & Electronic Engineering* (in Chinese), 1997, 19(2):50~54
- [13] 李 魁. 有限长观测数据的最大熵谱分析与算法. 云南大学学报(自然科学版), 1995, 17(1):93~99
Li S. The maximum entropy spectral analysis and its algorithm on finite length observed data. *Journal of Yunnan University* (in Chinese), 1995, 17(1):93~99
- [14] 魏华梁, 刘藻珍. 交叉谱估计及其在导弹系统仿真模型验证中的应用. 系统仿真学报, 1997, 9(3):116~121
Wei H L, Liu Z Z. Cross spectral estimation and its application to

- simulation models validation for missile systems. *Journal of Systems Simulation* (in Chinese), 1997, **9**(3): 116 ~ 121
- [15] 李建平. 小波分析与信号处理理论、应用及软件实现. 重庆: 重庆出版社, 1997
- Li J P. Wavelet Analysis and Signal Processing-Applications and Software Realizing (in Chinese). Chongqing: Chongqing Press, 1997
- [16] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(1): 61 ~ 77
- [17] Torrence C, Webster P. Interdecadal changes in the ENSO monsoon system. *Journal of Climate*, 1999, **12**: 2679 ~ 2690
- [18] Jevrejeva S, J C Moore, A. Grinsted influence of the Arctic Oscillation and El-Niño Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: the wavelet approach. *Journal of Geophysics Research*, 2003, **108**: 4677 ~ 4687
- [19] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system. *Science*, 2004, **305**: 503 ~ 505
- [20] Velicogna I, Wahr J. Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, 2006, **311**(5768): 1754 ~ 1756
- [21] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet. *Science*, 2006, doi: 10.1126/science.1129007
- [22] 周旭华, 吴 斌, 彭碧波等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测. *地球物理学报*, 2006, **49**(6): 1644 ~ 1650
- Zhou X H, Wu B, Peng B B, et al. Detection of global water storage variation using GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6): 1644 ~ 1650

(本文编辑 何 燕)

www.cnki.net