

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.01.07

SLR 不同地心运动确定方法研究 及其特征分析

邵 璠^{1,2,4}, 王小亚^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 上海天文台
上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030; 4. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043)

摘要: 处理了 Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1 和 Etalon-2 共 4 颗卫星在 1993—2017 年的全球卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 观测数据, 并对国际激光测距服务 (International Laser Ranging Service, ILRS) 各分析中心 (analysis centers, ACs) 的周解进行了技术内综合, 分别通过几何法 (参考 SLRF2008 和 SLRF2014) 和直接法 (针对 Lageos-1 和 Lageos-2) 确定了 SLR 地心运动序列; 利用傅里叶变换和最小二乘法分析了地心运动的长期变化、周年变化和半年变化, 并与 CSR (the center for space research) 提供的动力学法结果进行了比较和分析。结果表明: 地心运动的长期项比周期项小 1 个量级; 与 SLRF2008 几何法相比, 用 SLRF2014 几何法得到的地心运动长期项明显较小, 特别是在 Z 方向; 使用直接法分别针对 Lageos-1 和 Lageos-2 卫星激光测距数据解算的地心运动半年项有较好的一致性, 但周年项相位相差较大, 且在 Z 方向与几何法及 CSR 提供的动力学法结果差异也很大, 这可能与该方法解算的地心运动与测站偏心改正强相关有关, 也可能与单颗星解算地心运动几何结构不够好有关; 使用几何法得到的地心运动与 CSR 动力学结果非常接近, 证明利用上海天文台和 ILRS ACs 周解进行技术内综合来确定地心运动的方法是可行的。

关键词: 卫星激光测距; 技术内综合; 地心运动; 长期变化; 周期变化

中图分类号: P228 **文献标识码:** A

1 引 言

与地球相关的参考架原点主要有 3 个: 包括海洋和大气的整个地球的质量中心 (center of mass, CM)、不包括质量负荷的固体地球的质量中心 (center of Earth, CE) 和固体地球

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-05-05

资助项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0501405); 科技部基础性工作专项 (2015FY310200); 国家自然科学基金面上项目 (11973073, 11173048, 10873029); 宇航动力学国家重点实验室和上海市空间导航与定位技术重点实验室 (06DZ22101)

通讯作者: 王小亚, wxy@shao.ac.cn

外表面的形状中心 (center of figure, CF)。CM 通常被空间大地测量所采用, 因为卫星动力学是针对 CM 的, 理想地球参考架定义要求地球参考架原点定义在 CM。CE 应用于某些地球物理学理论研究, 如勒夫数的计算等。CF 通常应用于与地面测量相关的学科, 这里地面点间的几何形状是唯一可测量的量, 所以一般应用于与地面大地测量和形变测量等有关的研究^[1,2]。国际地球自转服务 (International Earth Rotation and Reference System Service, IERS) 发布的国际地球参考架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 是通过 SLR、甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和星载多普勒定轨定位系统 (Doppler orbitography and radio-positioning integrated by satellite, DORIS) 四种空间大地测量技术建立和维持的, 由各技术的全球观测网数据得到的技术内综合解, 经由技术间再综合得到台站坐标和速度场来实现, 其最初目标是要实现理想的地球参考架。由于四种空间大地测量技术台站都固定在地壳上, 由这些台站坐标和速度场确定的 ITRF 并不能直接反映地球整体质量分布和地心运动, 而是反映了由这些台站构成的多面体中心, 即观测站网的中心 (center of network, CN), 其近似于地球形状中心 CF^[1-4]。由于地球上海平面变化、冰川融化、大气环流、地幔对流和液核振荡等原因, 地球质量会发生迁移, 导致地球质心 CM 相对于地球形状中心 (即参考架原点) 发生位移, 这个位移被称为地心运动^[2]。地心运动必然会影响卫星精密定轨、地面点的精密定位、地球定向参数的确定、地球低阶引力场的确定以及所有以 ITRF 作为参考架的空间大地测量结果。因此, 对地心运动的研究十分重要。

Cheng 等人^[5]利用 5 颗激光卫星的 SLR 数据, 按照 IERS2003 规范, 通过估算地球引力位一阶系数 (采用的参考架为 LPOD2005, 在 SLRF2005 的基础上更新了一些测站坐标和速度), 研究了地心的周年运动。他们与 GRACE 得到的结果进行了比较, 发现其 X 方向 (2.5 mm) 与 ILRS X 方向 (2.7 mm) 和 GRACE X 方向 (3 mm) 符合得很好, 而 Y 和 Z 方向与 ILRS 和 GRACE 结果符合较差。Collilieux 等人^[6]以全球 SLR 数据解出的测站坐标作为类观测, 进行参考架转换, 得到平移参数, 但是, 认为该平移参数因为测站分布的不均匀性和稀疏性而不能被严格地当做地心运动, 它们之间的差别定义为网形效应。国内也有一些学者对地心运动进行了研究, 但地心运动的振幅与周期特性不完全一致。吴斌等人^[7]认为地心变化幅度不超过 5 cm, 秦显平和杨元喜^[8]发现地心运动存在近周年和半年的周期分量, 但地心运动的长期变化并不明显; 朱元兰和冯初刚^[9]研究表明地心 X 、 Y 方向变化幅度为 1 cm, Z 方向为 3 ~ 4 cm; 郭金运等人^[10]发现地心运动存在长期和周期变化; 李九龙^[11]研究表明地心运动主要呈现出季节性周期变化, 其中以周年项变化为主, 半周年项的变化不够明显。究其原因, 很大可能是基于老的 IERS 规范和针对单一卫星进行解算得到的地心运动并不可靠。我们利用上海天文台 SHORD II 软件, 处理了 Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1 和 Etalon-2 共 4 颗卫星从 1993 年 1 月—2017 年 12 月的 25 年 SLR 数据, 得到上海天文台 (Shanghai Astronomical Observatory, SHAO) 周解; 并与 ILRS 各分析中心 ACs 的周解进行技术内综合, 获得几何法的地心运动序列; 又利用 SHORD II 软件, 直接求解地心运动序列, 并将这两类解的结果与 CSR 动力法结果进行比较; 最后分析和探讨了不同地心运动确定方法结果的特征、可靠性和影响因素。

2 地心运动的计算方法

目前主要有四种空间大地测量技术,分别为 VLBI, SLR, GPS 和 DORIS。其中, VLBI 技术是一种相对测量,其观测目标是遥远的河外射电源,它们并不围绕地球转动,且其数据处理采用的是几何方法,所以 VLBI 技术自身无法确定地球参考架的原点。GPS 技术由于受轨道模型误差及其他因素如卫星钟差、整周模糊度、天线相位中心改正等相关性的影响,所以无法给出精确的地心运动变化,同时, GPS 卫星轨道较高且其数据处理经常采用的差分法也降低了对地心变化的敏感性。DORIS 技术由于受自身系统误差较严重和在轨观测卫星数变化影响,不能精确地解算出地球质心的位置^[11]。SLR 技术是目前最精密的地球参考架原点确定技术,其观测的目标大都是面质比小、结构简单的地球动力学卫星,且大部分激光卫星离地球比较近,对地心运动很敏感,这为监测地心运动提供了有利条件。

目前,采用 SLR 技术确定地心运动的方法有三种:几何法、直接法和动力学法。

2.1 几何法

几何法就是先求解测站坐标序列,然后再求解地心运动序列^[8]。该方法先利用卫星精密定轨得到测站在地心坐标系下的坐标序列,然后选择国际地球参考框架 ITRF (或其他较权威的地球参考框架)为参考基准,由 HELMERT 7 参数转换到这个 ITRF 地球参考框架,得出测站坐标相对于该 ITRF 地球参考架的平移量。该平移量即为地心运动时间序列。

假设 $X_w^i(t), Y_w^i(t), Z_w^i(t)$ 为利用卫星精密定轨得到的观测历元 t 时刻的第 i 个测站在地心坐标系下的坐标, $X_r^i(t_0), Y_r^i(t_0), Z_r^i(t_0)$ 为该测站在某个 ITRF 地球参考框架 (或其他较权威的地球参考框架)参考历元 t_0 时刻的坐标,则可获得该测站在该 ITRF 地球参考架历元 t 时刻的坐标 $X_r^i(t), Y_r^i(t), Z_r^i(t)$, 表示为:

$$\begin{cases} X_r^i(t) = X_r^i(t_0) + (t - t_0)\dot{X}_r^i \\ Y_r^i(t) = Y_r^i(t_0) + (t - t_0)\dot{Y}_r^i \\ Z_r^i(t) = Z_r^i(t_0) + (t - t_0)\dot{Z}_r^i \end{cases}, \quad (1)$$

其中, t_0 为该 ITRF 地球参考架的参考历元, $\dot{X}_r^i, \dot{Y}_r^i, \dot{Z}_r^i$ 为该测站在该 ITRF 地球参考架下的线性速度。通过 HELMERT 7 参数进行转换,可得:

$$\begin{bmatrix} X_r^i(t) \\ Y_r^i(t) \\ Z_r^i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w^i(t) \\ Y_w^i(t) \\ Z_w^i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_w^i(t) \\ Y_w^i(t) \\ Z_w^i(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, T_1, T_2, T_3 是 3 个平移参数,也是所要求取的地心运动 3 个分量; R_1, R_2, R_3 为 3 个旋转参数; D 为尺度因子。

几何法受到网形的影响,因此,为了使计算的地心运动序列更加真实可靠,我们应均匀

选取测站。我们在 Pavlis 和 Luceri^[12] 给出的 SLR 核心站基础上, 选择性地剔除数据不好的站点 (转换到新的参考架后, 与框架结果的差大于 0.3 m) 作为 SLR 核心站, 见表 1。通过这些核心站进行 7 参数转换, 得到的其中 3 个平移参数即是地心运动序列的 3 个分量。由于该方法与核心站的选取、数目和测站分布有关, 所以其可靠性会受这些因素的影响。

表 1 SLR 核心站列表

测站名	圆顶编号	起始年份/年	终止年份/年	参与周解次数统计 (截至 2017.12)
7080	40442M006	1993	—	1 061
7090	50107M001	1993	—	1 289
7105	40451M105	1993	—	1 145
7109	40433M002	1993	1997	178
7110	40497M001	1993	—	1 274
7210	40445M001	1994	2004	441
7237	21611S001	2014	—	189
7403	42202M003	1993	2000	305
7501	30302M003	2000	—	667
7810	14001S007	1998	—	839
7825	50119S003	2004	—	662
7832	20101S001	2001	2011	484
7835	10002S001	1993	2005	493
7836	14106S009	1993	2004	481
7837	21605S001	1997	2005	266
7839	11001S002	1993	—	1 172
7840	13212S001	1993	—	1 266
7841	14106S011	2004	—	487
7849	50119S001	1998	2003	224
7939	12734S001	1993	2000	314
7941	12734S008	2001	—	692
8834	14201S018	1996	2009	565

我们采用了几何法来确定地心运动序列。我们先通过对 Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1 和 Etalon-2 这 4 颗卫星进行弧长为 7 d 的松约束 (站坐标先验标准差为 1 m, 极移先验标准差为 20 mas, LOD 先验标准差为 2 ms) 定轨, 得到 SHAO 周解, 然后对 SHAO 周解与 ILRS 各分析中心的周解进行加权综合, 得到测站坐标, 具体综合过程如图 1 所示。对于 SINEX 解中存在的松约束不予消除, 我们进行直接综合, 然后利用方差分量估算法对其进行加权综合, 这样得到的综合周解还是松约束解^[13,14]。我们再对混合后的周解相对于 SLRF2008 和 SLRF2014 分别进行 7 参数转换求平移参数, 得到了两个地心运动序列。为了在下文图表中表述得清晰简洁, 我们将其分别命名为 SLRF2008 几何法和 SLRF2014 几何法。

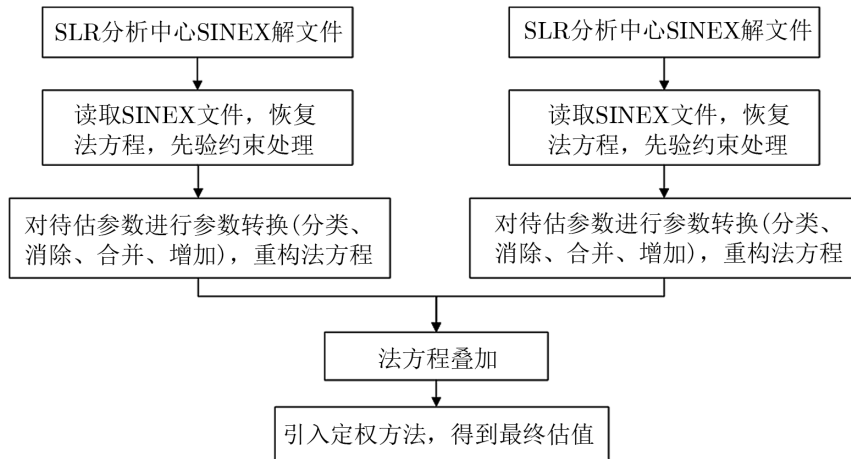


图1 SLR技术内综合流程图

2.2 动力学法

动力学法是通过处理 SLR 数据, 利用动力学法进行卫星精密定轨来估算地球引力位一阶系数, 从而确定地心运动序列^[9]。地球引力场是在地固坐标系中以球谐函数展开的, 如果坐标原点就是地球质心, 那么引力位的一阶项系数 C_{11}, S_{11}, C_{10} 将全部为 0。但实际上, 地球质心一直在运动, 也就是说 C_{11}, S_{11}, C_{10} 并不为 0, 动力学法就是在卫星精密定轨过程中, 将地球引力位一阶系数作为待估参数, 通过解算引力位一阶系数来确定地球的质心运动。地球引力位的球谐系数的级数展开形式一般为:

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos(m\lambda) + S_{nm} \sin(m\lambda)) \right], \quad (3)$$

式中, G 为地球引力常数, M 为地球质量, r 为地心向径, R 为地球半径, ϕ 为地心纬度, λ 为地心经度, P_{nm} 为缔合勒让德函数, C_{nm} 和 S_{nm} 为位系数, n 和 m 为位系数的阶和次, C_{nm} 和 S_{nm} 的大小反映了地球内部的物质分布情况, 其定义为:

$$C_{nm} = \frac{1}{MR^n} \frac{(2 - \delta_{nm})(n - m)!}{(n + m)!} \int_M r^n P_{nm}(\sin \phi) \cos(m\lambda) dM, \quad (4)$$

$$S_{nm} = \frac{1}{MR^n} \frac{(2 - \delta_{nm})(n - m)!}{(n + m)!} \int_M r^n P_{nm}(\sin \phi) \sin(m\lambda) dM, \quad (5)$$

式中, 当 $m = 0$ 时 $\delta_{nm} = 1$, 否则 $\delta_{nm} = 0$; dM 表示坐标为 (r, ϕ, λ) 的空间点处的质量元。

在大多数情况下, 大气、海洋、陆地水等都近似处理为地球表面质量负荷变化, 这样式 (4) 和式 (5) 的时变部分可以简化为^[11]:

$$C_{nm} = \frac{1}{M} \frac{2(n - m)!}{(n + m)!} \int_S L(\phi, \lambda, t) P_{nm}(\sin \phi) \cos(m\lambda) dS, \quad (6)$$

$$S_{nm} = \frac{1}{M} \frac{2(n - m)!}{(n + m)!} \int_S L(\phi, \lambda, t) P_{nm}(\sin \phi) \sin(m\lambda) dS, \quad (7)$$

式中, $L(\phi, \lambda, t)$ 为地球表面上随时间 t 变化的一点, dS 为该处的质量元, 式 (3) 中没有一次项, 这是假定 CM 在地球参考架原点, 当存在地心运动时, 其定义为:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{1}{M} \int_M x dM \\ \Delta y = \frac{1}{M} \int_M y dM \\ \Delta z = \frac{1}{M} \int_M z dM \end{cases}, \quad (8)$$

式中, x, y, z 为地球表面一点的三维坐标。如只考虑地球表面质量负荷 $L(\phi, \lambda, t)$ 变化引起的地球质心变化, 则上述方程可重写为:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{R}{M} \int_S L(\phi, \lambda, t) \cos \phi \cos \lambda dS \\ \Delta y = \frac{R}{M} \int_S L(\phi, \lambda, t) \cos \phi \sin \lambda dS \\ \Delta z = \frac{R}{M} \int_S L(\phi, \lambda, t) \sin \phi dS \end{cases}. \quad (9)$$

由式 (6), (7), (9) 可得:

$$\begin{cases} \Delta x = RC_{11} \\ \Delta y = RS_{11} \\ \Delta z = RC_{10} \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为地球质心运动的 3 个分量, C_{11}, S_{11}, C_{10} 为地球引力位一阶系数。

2.3 直接法

直接法就是在卫星精密定轨过程中将地心运动作为待估参数, 在测量模型中加入地心运动改正项, 通过循环迭代求得地心的位移量^[9]。台站坐标定义在形心坐标系下, 卫星轨道定义在质心坐标下, 由于地球质心相对于形状中心存在地心运动, 因此激光测距观测值须增加这一项改正。地心运动的具体改正方程为:

$$\Delta \rho_{mc} = (\rho_x \Delta x + \rho_y \Delta y + \rho_z \Delta z) / \rho, \quad (11)$$

其中, $\Delta \rho_{mc}$ 为地心运动引起的激光测距改正, $\rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2}$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为地心在测站坐标系中的位移量, ρ_x, ρ_y, ρ_z 为卫星在测站坐标系中的坐标。

该方法的一个本质缺陷就是其地心运动估值与 SLR 测量误差中的偏心改正强相关, SLR 测站偏心改正公式为:

$$\Delta \rho_{RO} = (\rho_x EC_E + \rho_y EC_N + \rho_z EC_U) / \rho, \quad (12)$$

其中, $\Delta \rho_{RO}$ 为测站偏心改正; ρ 为卫星到测站的距离, ρ_x, ρ_y, ρ_z 分别为 ρ 在测站坐标系中的 3 个分量; EC_E 为测量设备的测量中心相对于测站标定坐标在东向的偏心量; EC_N 为测

量设备的测量中心相对于测站标定坐标在北向的偏心量； EC_U 为测量设备的测量中心相对于测站标定坐标在高程方向的偏心量。

在 SLR 数据处理中，通常不计算测站偏心改正，从式 (11) 和 (12) 可以看出，其公式非常相似，即地心改正实际估算了所有测站的共同偏心改正，测站的偏心改正误差也在其中。

本文分别利用 Lageos-1 和 Lageos-2 的 SLR 数据，采用直接法进行了地心运动解算，为了表述清晰简洁，其结果分别命名为 Lageos-1 直接法和 Lageos-2 直接法。直接法计算地心运动所采用的模型和解算策略如表 2 所示。

表 2 SLR 直接法计算地心运动所采用的模型和策略

项目	Lageos-1/Lageos-2 卫星	
参考架和测量模型	地球参考架	SLRF2014
	岁差模型	IAU2006
	章动模型	IAU2006+IERS 章动改正
	大气折射改正	Mendes-Pavlis 模型
	质心改正/m	依测站而定 (0.245 ~ 0.251)
力学模型	地球重力场/阶	EGM2008 (100100)
	固体潮摄动	IERS2010
	海潮摄动	FES2004
	行星摄动	JPL DE421
参数估计	卫星坐标	估算 6 个轨道根数
	EOP	每 3 d 估算一组
	光压和大气阻力	每 3 d 估算一组
	经验力	每 3 d 估算一组 N 和 T 方向经验力
	地心	每天估算一组
	定轨弧长	7 d

3 地心运动特征分析

对获得的地心序列首先进行了傅里叶频谱分析，分析其中所含周期，然后假设地心运动同时具有长期项和周期项，则地心运动的时间序列可以表示为：

$$\Delta R_j = c + dt_j + \sum_{h=1}^k A_h \cdot \sin(2\pi f_h t_j + \theta_h) \quad , \quad (13)$$

其中， c 为长期变化中的常数项， d 为长期变化中的系数项， k 为周期函数的个数， A_h 为对应第 h 个周期项的振幅， f_h 为对应的频率， θ_h 为对应相位。将信号中的周期项展开可得：

$$A_h \cdot \sin(2\pi f_h t_j + \theta_h) = a_h \cdot \sin(2\pi f_h t_j) + b_h \cdot \cos(2\pi f_h t_j) \quad , \quad (14)$$

其中，

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad , \quad (15)$$

$$\theta_h = \arctan(b_h/a_h) \quad . \quad (16)$$

将求解的地心运动 ΔR_j 当作已知观测量, 代入式 (13) 中, 则可得到误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} - \mathbf{L} \quad , \quad (17)$$

式中, \mathbf{V} 为地心运动 ΔR_j 的残差向量, \mathbf{X} 为未知数向量 (即所求的周期项和长期项系数), \mathbf{B} 为系数矩阵, \mathbf{L} 为由 ΔR_j 组成的向量。通过最小二乘法可得未知数向量的估值为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad , \quad (18)$$

其中, \mathbf{P} 为地心运动的权矩阵, 此处取单位权。当求得参数向量 \mathbf{X} 后, 可通过式 (15) 和式 (16) 得到周期项的振幅和相位, 这样就可以获得地心运动的长期变化和周期变化特征。

4 结果分析

本文利用上海天文台 SHORD II 软件处理了 Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1 和 Etalon-2 这 4 颗卫星从 1993 年 1 月—2017 年 12 月期间的 SLR 数据, 将得到的 SHAO 周解与 ILRS 各分析中心 (包括 ASI, BKG, DGFI, ESA, GRGS, JCET 和 NSGF) 提供的周解进行加权混合, 由混合后的解进行 7 参数转换, 分别得到以 SLRF2008 和 SLRF2014 作为参考的两个地心运动序列, 并进行了傅里叶变换及长期和周期性特征分析, 其结果见图 2—4。图 2 显示了 SLRF2008 几何法确定的地心序列傅里叶频谱分析, 证实了地心在 X , Y , Z 三个方向上有明显的周年项和半年项, 周期分别为 0.9996 a 和 0.4996 a, 然后对地心序列中的周年项、半年项的振幅和相位以及长期项按照第 3 章方法进行最小二乘法拟合, 这里只给出了基于 SLRF2008 的几何法傅里叶频谱分析结果, 其他结果类似, 并且周期也相同。图 3 和图 4 分别给出了 SLRF2008 几何法和 SLRF2014 几何法确定的地心运动及其特征拟合序列, 从图中可以看出周期拟合序列较好地模拟了原始的地心运动序列, 但是在振幅上的拟合结果还不是很好, 特别是在 Z 方向。

利用 Lageos-1 和 Lageos-2 的 SLR 数据并通过直接法确定了地心运动, 结果如图 5 和图 6 所示。图 7 给出了 CSR 利用动力学法确定的地心运动。图中, 黑色曲线代表最小二乘法拟合的线性项和周期项之和。可以发现, 地心运动在 X , Y 方向变化幅度均比较小, 而在 Z 方向变化幅度较大, 且通过直接法求得的地心序列比几何法和动力学法求得的变化幅度更大, 更不规则, 特别是在 Z 方向。这可能是因为直接法求解的质心运动与 SLR 测站偏心改正强相关, 其可靠性相对较低。

我们采用几何法和直接法计算了地心运动与 CSR 提供的动力学法地心运动序列的平均统计结果 (如表 3 所示), 其中 CSR 的结果来自于 <ftp.csr.utexas.edu/pub/slr/geocenter> 发布

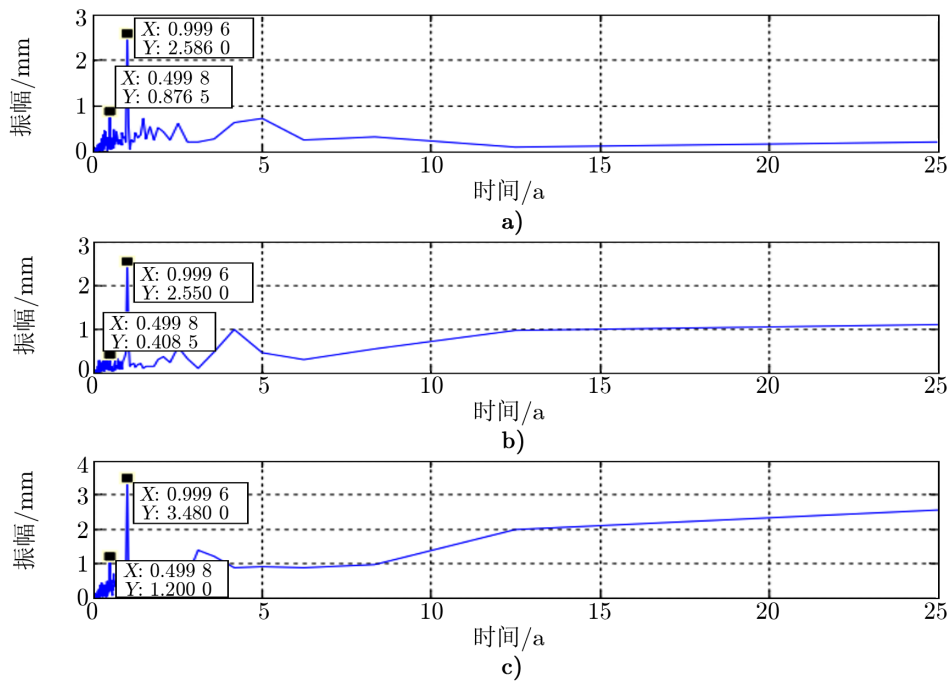


图2 SLRF2008 几何法确定的地心运动序列傅里叶频谱分析图

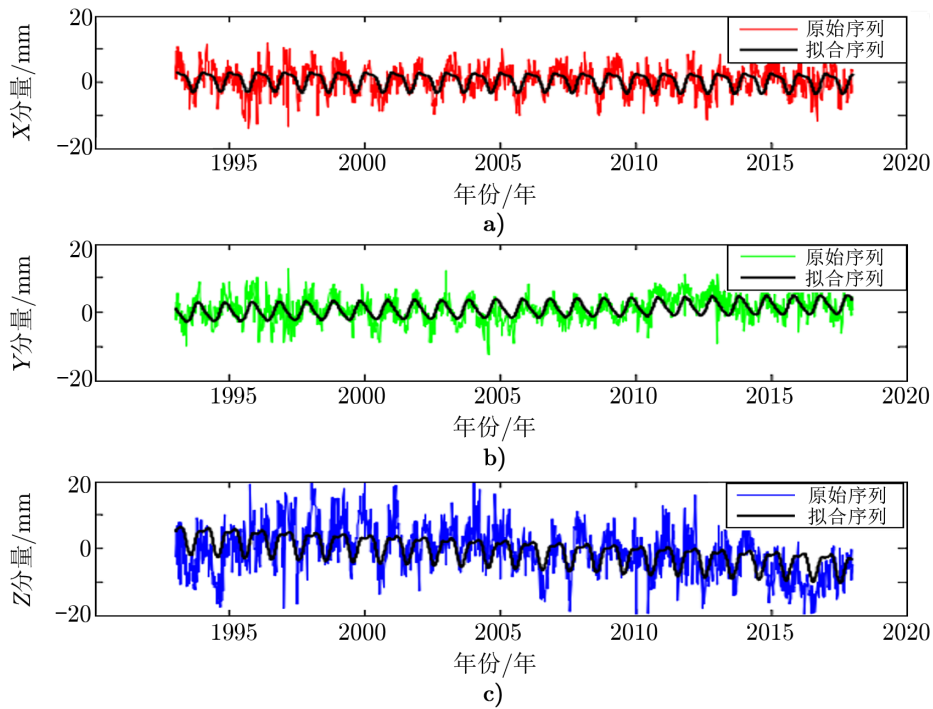


图3 SLRF2008 几何法确定的地心运动序列及其特征拟合序列

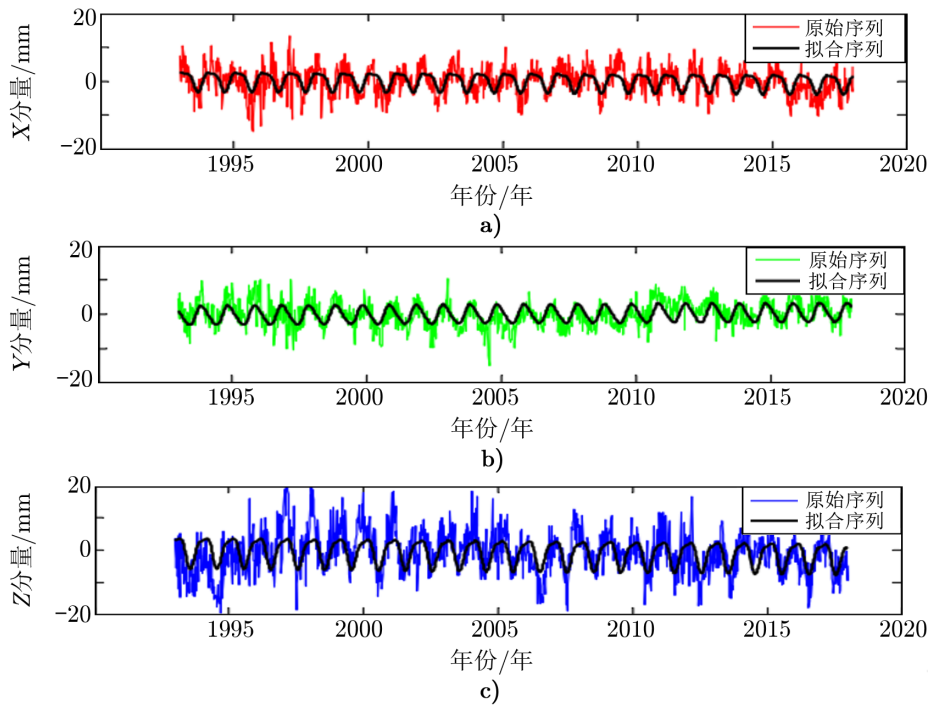


图 4 SLRF2014 几何法确定的地心运动序列及其特征拟合序列

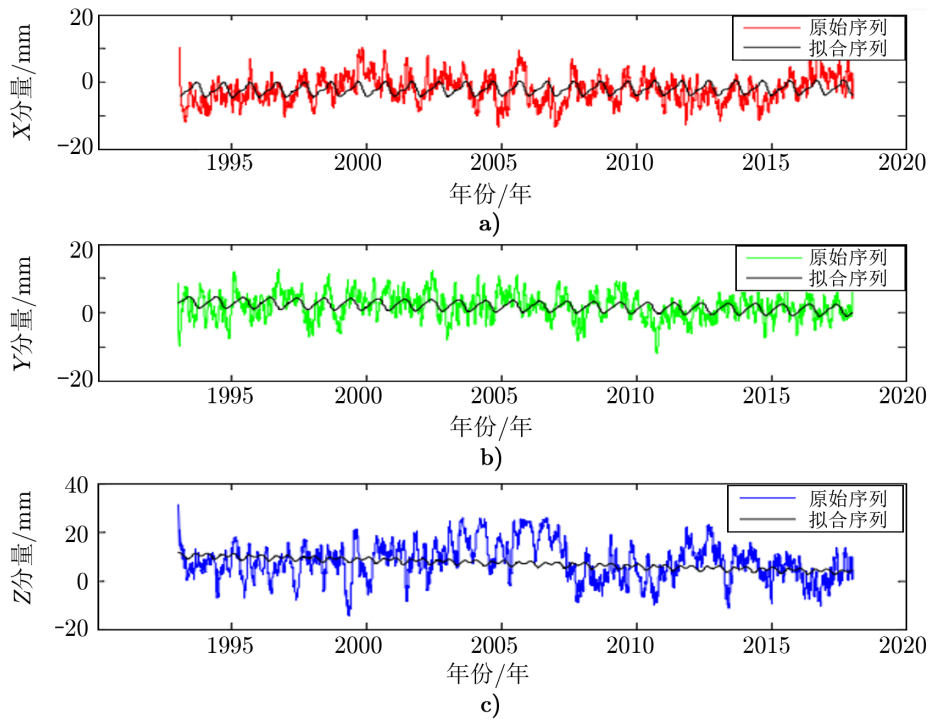


图 5 Lageos-1 直接法确定的地心运动序列

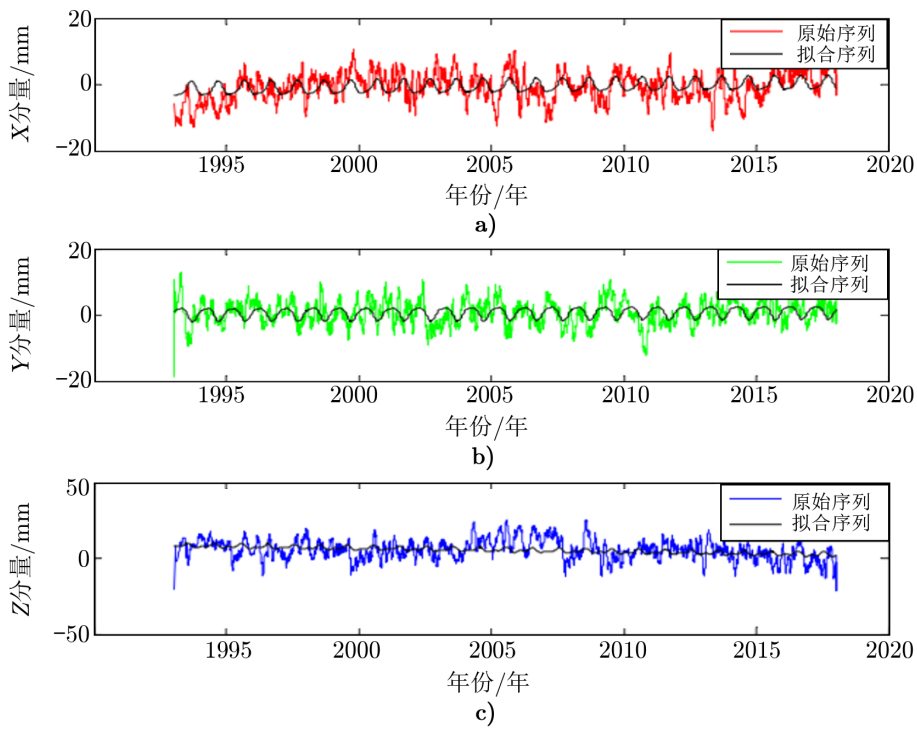


图6 Lageos-2 直接法确定的地心运动序列

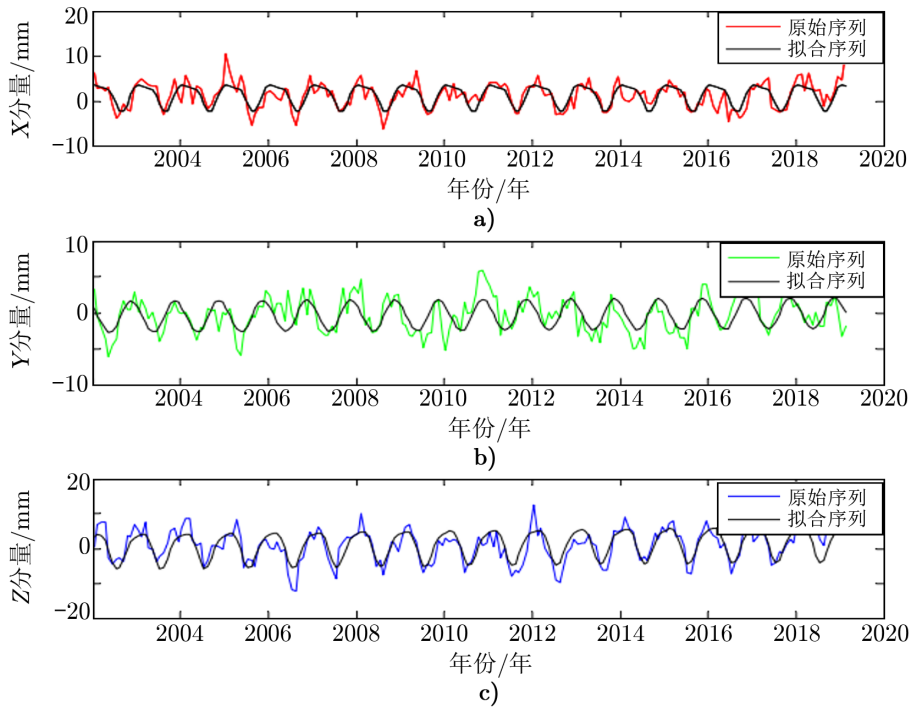


图7 CSR 动力学法确定的地心运动序列

的地心运动序列, 其时间跨度为 2002—2017 年, 解算频率为每 30 d 提供一组解, 选择的参考架原点为 SLRF2014 原点。从表 3 中可以看出, 利用直接法求得的地心运动平均值比几何法和动力学法的结果偏大, 几何法求得的地心运动与 CSR 提供的动力学法结果较接近。

表 3 SLR 不同方法监测地心运动的平均统计结果 mm

计算方法	X	Y	Z
SLRF2008 几何法	0.41 ± 4.05	0.94 ± 3.61	1.03 ± 7.02
SLRF2014 几何法	-0.01 ± 3.93	0.03 ± 3.57	0.95 ± 6.49
Lageos-1 直接法	-2.12 ± 4.10	1.75 ± 3.64	7.27 ± 7.34
Lageos-2 直接法	-0.35 ± 4.21	0.71 ± 3.63	5.23 ± 6.62
CSR 动力学法	1.25 ± 2.84	-0.28 ± 2.42	1.07 ± 4.69

表 4 给出了本文和基于 CSR 提供的动力学地心运动序列分别拟合得到的地心运动长期变化率。从表中可以看出, 利用参考 SLRF2014 的几何法确定的地心长期运动速率比利用参考 SLRF2008 几何法确定的结果明显小, 特别是 Z 分量, 说明地球参考架 SLRF2014 相对于 SLRF2008 定义的原点更加稳定。利用几何法和直接法求得的地心运动速率 Z 分量与 CSR 结果存在差异, 其原因可能是几何法求得结果受网形影响, 由于核心站南北分布不均匀, 导致解算的地心运动 Z 分量可靠性降低。而直接法使用的是单星解, 卫星观测几何强度不够, 解算的地心运动 Z 分量存在误差, 但从整体结果来看, 本文计算的地心运动速率与 CSR 提供的速率较一致, 都比较小, 说明 SLR 确定的地心比较稳定, 其长期变化并不明显。其中, 基于 SLRF2014 几何法确定的地心稳定性好于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 其他方法确定的地心稳定性差于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 4 地心运动长期变化率 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$

计算方法	X	Y	Z
SLRF2008 几何法	-0.03	0.09	-0.36
SLRF2014 几何法	-0.03	0.04	-0.07
Lageos-1 直接法	0.02	-0.09	-0.27
Lageos-2 直接法	0.08	0.02	-0.25
CSR 动力学法	0.00	0.03	0.13

本文对地心运动在 X , Y , Z 三个方向上的周年及半年项振幅和相位 (相位的参考历元为 1 月 1 日) 进行了解算, 并与 CSR 的结果进行对比 (如表 5 所示), CSR 结果来自对其提供的地心运动序列进行类似的周年项及半年项最小二乘法拟合。从表 5 可以看出, 使用 Lageos-1 直接法与 Lageos-2 直接法确定的地心运动序列, 其半年项比较接近, 但是周年项相位相差较大, 这一方面可能与该方法参数之间的相关性较强有关, 也可能与单颗卫星解算地心运动时的观测几何强度不够有关。通过比较还发现 SLRF2014 几何法与 SLRF2008 几何法得到的地心运动较接近, 其中 SLRF2014 几何法得到的周年项和半年项与 CSR 动力学法结果更接近, 这说明通过对 SHAO 提供的 SLR 周解与 ILRS 各分析中心提供的周解进行技术内加权综合后, 可以得到较可靠的地心运动序列。

表 5 地心运动周年项的振幅和相位与半年项的比较

	计算方法	X 方向		Y 方向		Z 方向	
		振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)
周 年 项	SLRF2008几何法	2.76	340.22	2.63	61.92	3.76	313.45
	SLRF2014几何法	2.72	343.16	2.72	62.47	4.47	314.99
	Lageos-1直接法	1.84	333.82	1.57	59.66	0.70	73.14
	Lageos-2直接法	1.95	354.78	1.83	19.92	1.15	303.35
	CSR动力学法	2.76	343.92	2.15	68.07	4.89	317.88
半 年 项	SLRF2008几何法	1.02	341.76	0.45	55.38	1.61	70.04
	SLRF2014几何法	0.88	339.49	0.39	53.05	1.39	67.93
	Lageos-1直接法	0.79	19.80	0.41	39.84	0.82	301.57
	Lageos-2直接法	0.41	16.91	0.59	10.87	0.77	282.49
	CSR动力学法	0.88	345.4	0.09	55.07	1.18	74.61

5 结 论

本文处理了 Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1 和 Etalon-2 这 4 颗卫星在 1993—2017 年期间的全球 SLR 观测数据, 分别通过几何法 (参考 SLRF2008 和 SLRF2014) 和直接法 (针对 Lageos-1 和 Lageos-2) 确定了 SLR 地心运动序列, 利用傅里叶变换和最小二乘法分析了两种方法解算的地心运动的长期变化率、周年项和半年项振幅和相位, 并与 CSR 提供的动力学法结果进行了比较, 发现: (1) 地心运动的长期项比周期项小 1 个量级; (2) 与 SLRF2008 几何法相比, SLRF2014 几何法得到的地心运动长期项明显减小, 特别是在 Z 方向, 且其得到的地心运动周年项和半年项与 CSR 动力学法得到的结果很相似, 说明综合 SHAO 与 ILRS ACs 周解来确定地心运动是可行的; (3) 将 Lageos-1 直接法与 Lageos-2 直接法确定的地心运动序列相比, 其半年项有较好的一致性, 但周年项相位相差较大, 与几何法及 CSR 提供的动力学结果在 Z 方向差异也很大, 这可能与该方法解算的地心运动与测站偏心改正强相关有关, 也可能与单颗卫星解算地心运动几何结构不够好有关, 该方法的可靠性有待进一步提高。

参考文献:

- [1] Dong D, Dickey J O, Chao Y, et al. Geophysical Research Letters, 2013, 24(15): 1867
- [2] 董大南, Yunck T, Heflin M, 等. 世界地震译丛, 2007(1): 53
- [3] 何冰, 王小亚, 王家松. 天文学进展, 2018, 36(2): 189
- [4] 邹蓉. 博士论文. 武汉: 武汉大学, 2009: 12
- [5] Cheng M K, Ries J C, Tapley B D. Geocenter Variations from Analysis of SLR Data[M]. Berlin: Springer, 2013
- [6] Collilieux X, Altamimi Z, Ray J, et al. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2009, 114(B4): 153
- [7] 吴斌, 彭碧波, 许厚泽. 科学通报, 1999, 44(10): 1106
- [8] 秦显平, 杨元喜. 测绘学报, 2003, 32(2): 120
- [9] 朱元兰, 冯初刚. 测绘学报, 2005: 19

- [10] 郭金运, 常晓涛, 韩延本, 等. 测绘学报, 2009, 38(4): 33
[11] 李九龙. 硕士论文. 山东: 山东科技大学, 2015: 53
[12] Pavlis E, Luceri C. EGU General Assembly, 2010, 16: 51
[13] Bianco G, Devoti R, Luceri V. IERS Technical Note, 2003, 30: 107
[14] Davies P, Blewitt G. JGR, 2000, 105: 11083

Method Research and Feature Analysis on the Geocenter Motion Derived from SLR

SHAO Fan^{1,2,4}, WANG Xiao-ya^{1,2,3,4}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 4. State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: The global SLR observation data of Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1 and Etalon-2 from 1993 to 2017 were processed and combined with the weekly solutions of the ILRS analysis centers (AC). Then with the geometry and direct methods we get the time series of geocenter motion. The series are analyzed by Fourier transform and least squares methods to obtain the secular, annual and semi-annual variations of geocentric motion, and then compared with the results derived from dynamic method provided by CSR. The results show that the secular variations are one order of magnitude smaller than periodic variations.

Compared with SLRF2008, the secular variations in geocenter motion are greatly reduced when using the origin defined by SLRF2014, especially in the Z direction. The geocenter motion calculated by the direct method from Lageos-1 and Lageos-2 satellites respectively show a good consistency on semi-annual term, but the phase of annual term is quite different. Additionally, the results of the direct method have a big offset with the result derived from the geometry method and dynamic method provided by CSR in the Z direction, which may due to the strong correlation between the geocenter motion calculated by this method and the eccentricity corrections, or may be related to the poor geometry by using one single satellite; the geocenter motion obtained by the geometric method has a good consistency with that of CSR, demonstrating the feasibility of combining SHAO and ILRS ACs' weekly solutions to determine the geocenter motion.

Key words: satellite laser ranging; intra-technique combination; geocenter motion; secular variations; periodic variations

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ., MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献(按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出)。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (<http://202.127.29.4/twxjz/index.htm>) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2020年4月