

用 Lageos 卫星 SLR 资料解算地球定向参数及监测地球质心的运动

朱元兰¹, 冯初刚²

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

Earth Orientation Parameter and the Geocentric Variance During 1993~ 2002 Solved with Lageos SLR Data

ZHU Yuan-lan¹, FENG Chu-gang²

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: We solve the Earth Orientation Parameter (EOP) and the geocentric variation using the Lageos Satellite Laser Range (SLR) data from 1993 to 2002. The results are compared with EOP(IERS) C04 and (IERS) geocentric variation during the same period. The EOP(SHAO) shows the consistency of $X_p - 0.39$ mas, $Y_p - 0.41$ mas for the polar motion and $D_r - 0.03$ ms for the length-of-day (LOD) variation. The geocentric variation shows the accuracy of $X, Y - 1.0$ cm and $Z - 3 \sim 4$ cm.

Key words: SLR (satellite laser range); EOP (earth orientation parameter); IERS (International Earth Rotation Service)

摘要: 利用 Lageos 卫星(1993~ 2002 期间) 全球激光测距资料精确测定地球定向参数及地心的变化, 并将 EOP(SHA) 序列的结果与同期的 EOP(IERS) C04 进行比较, 符合程度: 极移 $X_p - 0.39$ mas, $Y_p - 0.41$ mas, 日长 D_r 在 0.03 ms 左右。地心在 X, Y 方向大约有 1 cm 左右的变化, 在 Z 方向有 3~ 4 cm 左右的变化。

关键词: 激光测距; 地球定向参数; IERS

1 引言

地球定向参数(EOP)或地球自转参数包括极移和日长变化, 描述了地固参考系相对于瞬时真天球参考系的运动。极移两分量 X_p, Y_p 表示天球历书轴在地球参考系中的运动; 而世界时与协调时之差 UT-UTC 或日长变化则反映了地球自转的不均匀性。地球定向参数可应用于飞行器的精密定位和导航, 而且由于它包含有丰富的地球

动力学信息, 利用现代空间技术精确测定地球自转参数还具有重要的天文地球动力学意义^[1]。在解算地球自转参数时, 同时也解算了地球的质心运动(以 15 d 为一组), 在此也作了分析。

本文利用 1993~ 2002 年期间 Lageos 卫星的激光测距资料, 用改进的 EOP 数学模型, 及参照 IERS 规范(1996)的天文常数、参考系、力学模型和测量模型, 归算出这 10 年的地球定向参数及监测地球质心的运动, 然后将此 EOP(SHA) 序列与

相应的 EOP(IERS) C04 序列比较, 以检验解算结果的可靠性。

2 在精密定轨中所采用的模型和方法

为了提高 EOP 和监测地球质心运动的解算精度, 整个处理过程依据统计轨道原理^[2]。分析过程采用的天文常数、参考系、力学模型和测量模型参照 IERS 规范(1996)^[3]。

2.1 力学模型

① 日月引力摄动; ④ 固体潮摄动; ④ 海潮摄动; ¼ 地球形状摄动(JGM3 地球引力场模型); ½ 太阳光压和地球辐射压摄动(光压系数 C_R 及变率 \dot{C}_R 待估); ¼ 类阻力摄动(阻力系数 C_D 及变率 \dot{C}_D 待估); ⑧ 卫星热迟后辐射摄动; ⑦ 广义相对论; ⑥ 地球自转变形摄动; ⑤ 经验的以卫星轨道周期为周期的 RTN 摄动。

2.2 测量模型

① Marini+Murray 大气折射模型; ④ Lageos 卫星的归心改正, 0.251 m; ④ 固体潮引起的台站位移; ¼ 永久潮汐项对台站的影响; ½ 海潮负荷潮对台站的影响; ¼ 地球自转变形对台站的影响。

2.3 参考系

① 2 000.0 平赤道($X - Y$ 平面)和平春分点(X 轴方向); ④ IAU76 岁差; ④ IAU 1980 章动模型, 加上 IERS 章动改正; ¼ DE403/LE403 行星历表; ½ 地球参考架 ITRF2 000, 测站坐标由 ITRF2 000 中的历元坐标和速度场求得。

解得收敛标准为卫星在 60 d 轨道的初始位置的改正小于 1 cm, 同时 60 d 内观测残差相对于预报残差的相对误差小于 0.01。

在用 Lageos 卫星的 SLR 资料解 EOP 时, 用的数学模型是^[4]:

对 X_p 有

$$\begin{aligned}
X_p(t) = & X_p(t_0) + \Delta X_{pc}(I) + \\
& [X_{p_{1p}}(j) + X_{p_{1R}}(j)] \cos \theta_g + \\
& [Y_{p_{1p}}(j) - Y_{p_{1R}}(j)] \sin \theta_g + \\
& [X_{p_{2p}}(j) + X_{p_{2R}}(j)] \cos 2\theta_g + \\
& [Y_{p_{2p}}(j) - Y_{p_{2R}}(j)] \sin 2\theta_g \quad (1)
\end{aligned}$$

对 Y_p 有

$$\begin{aligned}
Y_p(t) = & Y_p(t_0) + \Delta Y_{pc}(I) + \\
& [-X_{p_{1p}}(j) + X_{p_{1R}}(j)] \cos \theta_g + \\
& [Y_{p_{1p}}(j) + Y_{p_{1R}}(j)] \sin \theta_g +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [-X_{p_{2p}}(j) + X_{p_{2R}}(j)] \cos 2\theta_g + \\
& [Y_{p_{2p}}(j) + Y_{p_{2R}}(j)] \sin 2\theta_g \quad (2)
\end{aligned}$$

对日长变化 D_R (亦即对 UT1 的计算) 有 $(UT1R-TAI)_t = (UT1R-TAI)_{t_0} +$

$$\begin{aligned}
& D_{UTC}(i) [(t - t_0 - (i - 1) \text{arcdut})] + \\
& du1c(j) \cos \theta_g + du1s(j) \sin \theta_g + \\
& du2c(j) \cos 2\theta_g + du2s(j) \sin 2\theta_g \quad (3)
\end{aligned}$$

上述式(1)至式(3)表明有 15 个要解的参数:

$$[\Delta X_{pc}, \Delta Y_{pc}, X_{p_{1p}}, X_{p_{1R}}, Y_{p_{1p}}, Y_{p_{1R}}, X_{p_{2p}}, X_{p_{2R}}, Y_{p_{2p}}, Y_{p_{2R}}, D_{UTC}, du1c, du1s, du2c, du2s]。$$

其中, $X_{p_{1p}}, X_{p_{1R}}, Y_{p_{1p}}, Y_{p_{1R}}$ 是在第 j 个弧段的极移周日分量的顺行和逆行部分的系数; $X_{p_{2p}}, X_{p_{2R}}, Y_{p_{2p}}, Y_{p_{2R}}$ 是在第 j 个弧段的极移半周日分量的顺行和逆行部分的系数; $du1c, du1s$ 是在第 j 个弧段的 $\Delta UT1R$ 的周日分量的系数; $du2c, du2s$ 是在第 j 个弧段的 $\Delta UT1R$ 的半周日分量的系数; θ_g 是恒星时角。

由于分辨率的原因, 这部分的系数是在较长的弧段里解的。如果, $\Delta X_{pc}, \Delta Y_{pc}, D_{UTC}$ 是在 3 d 弧段里解得的, 那么, 周日和半周日部分应该根据资料的密度选择比 3 d 长的弧段来解, 一般选 6 d 或 8 d 的弧段。所以, 在多级复弧法中, $\Delta X_{pc}, \Delta Y_{pc}, D_{UTC}$ 的弧段标志符号与周日和半周日部分的弧段标志符号是不同的。在实际应用当中, EOP 的半周日部分往往不解。主要原因是资料的密度不够。

这里有必要叙述一下解算 EOP 的过程里时间的计算, 主要是 UT1 的计算。在解算 EOP 的过程中, 涉及到的时间系统有 UTC(协调世界时)、TDT(地球动力学时)、TAI(国际原子时)、UT1(世界时)、 $(UT1R-TAI)_{t_0}$ 为历元时刻 t_0 (地球动力学时) 的值。

$$\begin{aligned}
UT1_t = & ET_t - (ET - UT1)_t = \\
& ET_t - [(ET - TAI)_t - (UT1 - TAI)_t] = \\
& ET_t - \{(ET - TAI)_t - [(UT1R - TAI)_t + \\
& (35 \text{ d 以下的短周期项})_t]\} = \\
& ET_t - \{(ET - TAI)_t - [(UT1R - TAI)_{t_0} + \\
& D_{UTC}(i) \cdot (t - t_0 - (i - 1) \cdot \text{arcdut}) + \\
& du1c(j) \cdot \cos \theta_g + du1s(j) \cdot \sin \theta_g + \\
& du2c(j) \cdot \cos 2\theta_g + du2s(j) \cdot \sin 2\theta_g + \\
& (35 \text{ d 以下的短周期项})_t]\}
\end{aligned}$$

式(4)中的 ET 可以认为是 TDT, t 和 t_0 也是在

TDT 系统中计算的。需要注意的是对 $(UT1R - TAI)_{t_0}$ 处理: $(UT1R - TAI)_{t_0}$ 可以在长弧开始时不设定, $(UT1R - TAI)_t$ 随时从 EOP 数据文件中读入, 然后加上估计得到的改正值, 式子如下

$$(UT1R - TAI)_t = (ut1r - tai)_{k+1} + \frac{[(ut1r - tai)_{k+1} - (ut1r - tai)_k]}{t_{k+1} - t_k} (t - t_k) + D_{UTC}(i) (t - t_0 - (i - 1) arcdut) + D_{U1C}(j) \cos \theta_g + D_{U1S}(j) \sin \theta_g + D_{U2C}(j) \cos 2\theta_g + D_{U2S}(j) \sin 2\theta_g \quad (5)$$

式(5)中的 $(ut1r - tai)_k, (ut1r - tai)_{k+1}$ 为 EOP 数据文件中对应于 t 时刻的间隔的两个端点值。

事实上, $\frac{[(ut1r - tai)_{k+1} - (ut1r - tai)_k]}{t_{k+1} - t_k}$ 就是在 EOP 数据文件中与 t 时刻对应的间隔上的 $(UT1R - TAI)$ 的变化率。这时的 $D_{UTC}(i)$ 就是第 i 弧段(弧长为 $arcdut$) 覆盖的在 EOP 数据文件中与 t 时刻对应的间隔上的 $(UT1R - TAI)$ 的平均变化率的改正值。因此, 当整个解收敛时, 输出的应该是各个子弧段上的 $(UT1R - TAI)$ 的平均变化率加上估计得到的改正值。由于估计得到的是每个弧段的观测的加权平均时刻的改正值, 所以实际上输出的是该加权平均时刻对应的 $(UT1R - TAI)$ 的变化率加上估计得到的改正值。式(1)、(2)中的 $X_p(t_0), Y_p(t_0)$ 也可仿照 $(UT1R - TAI)_{t_0}$ 的处理方式: 不设常值, 只从 EOP 数据文件中读入, 然后加上估计得到的改正值。经实际比较, 这样处理更符合实际。在整个解算过程中, 有一点应引起我们的注意: 每次直接从方程中解得的值是某一参考解的改正值, 对轨道如此, 对极移、日长变化率也是如此。

这样改动后, 有助于提高解得的 EOP 的精度, 尤其是 LOD 作了类似的改动后, 明显提高了解得的 LOD 的精度, 减小了 rms, 从而也提高了解得的卫星轨道的精度。

在参考系方面, 根据 IERS 1996 规范, 真恒星时角从 1997 年 1 月 1 日开始用下列公式

$$GST = GMST + \Delta \varphi \cos(\epsilon_1 + \Delta \epsilon) + 0.00264'' \sin \Omega + 0.000063'' \sin 2\Omega \quad (6)$$

式中, $GMST$ 是格林尼治平恒星时; $\Delta \varphi$ 为黄经章动; ϵ_1 为平黄赤交角; $\Delta \epsilon$ 为交角章动; Ω 为月球平轨道在黄道上升交点的黄经。

章动模型, 根据 IERS 1996 规范为

$$\begin{cases} \Delta \varphi = \Delta \varphi(\text{IAU1980}) + \delta \Delta \varphi \\ \Delta \epsilon = \Delta \epsilon(\text{IAU1980}) + \delta \Delta \epsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Delta \varphi(\text{IAU1980}), \Delta \epsilon(\text{IAU1980})$ 是根据 IAU1980 模型求得的黄经章动和交角章动的值; $\delta \Delta \varphi, \delta \Delta \epsilon$ 是根据 VLBI 和 LLR 得到的黄经章动和交角章动的改正值(从 IERS 发布的 EOP 公报上可以得到)。增加的 $\delta \Delta \varphi, \delta \Delta \epsilon$ 对提高解日长变化率的精度是很有帮助的。

3 地球质心运动及监测

地球的质心是由整个地球(包括海洋和大气)的质量分布所决定的, 它也是地球卫星绕其旋转的动力学中心。而作为协议地球参考架的观测站则位于固体地球的表面, 由这些观测台站组成的地球参考框架的几何中心(即地心)与地球的质量中心当然不一定重合。近几年来已由 SLR, GPS 等空间技术和绝对重力测量技术监测得到较可靠的地球质心运动的定量结果, 这里所指地球质心运动就是地球质心相对于地球参考架几何中心的运动。地球质心的运动使协议地球参考架的定义产生了一定的困难。一方面协议地球参考系的原点定义在质心, 另一方面代表协议地球参考系的几何框架是建立在地壳上, 而地壳(与地壳以下的地球质量分布无关)相对于质心是运动的。两者之间显然不相容的, 为了使高精度的地球参考架得到很好的维持必须精确地监测地球质心相对于地心的运动。测站坐标在时刻 t 表示为

$$R_i(t) = R_i(t_0) + V_i(t - t_0) + \Delta R_i(t) + \Delta R_0(t) \quad (8)$$

$R_i(t_0)$ 为参考历元 t_0 时刻测站的 3 维坐标矢量。 V_i 为 i 测站的长期位移速度矢量, 包括板块运动, 区域性的地壳形变和冰期后地壳回弹等, $\Delta R_i(t)$ 是 i 测站的周期变化矢量, 包括固体潮、海潮、大气潮、极潮和海洋负载引起的测站周期性运动。式(3)中的前 3 项即是测站相对于地球参考架几何中心, 即地心的坐标, $\Delta R_0(t) = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为地心相对于质心变化。监测地球质心的运动, 也就是测定 $\Delta R_0(t)$ 。地球质心的运动是由于地球的大气, 海洋和固体地球物质质量的重新分布引起的, 因此质心运动还直接反映在地球引力场的一阶球谐系数的变化上, 并有

$$\Delta R_0(t) = -R_e \times (C_{10}(t), S_{11}(t), C_{10}(t)) \quad (9)$$

R_e 为地球平均半径, $(C_{10}(t), C_{11}(t), S_{11}(t))$ 为地球引力场一阶球谐系数, 如果质心运动为厘米级, 则引力位一阶球谐系数 $C_{10}(t), C_{11}(t)$ 和 $S_{11}(t)$,

应为 10^{-9} 量级。

整个分析过程采用多级复弧法。多级复弧法

的解参数与弧段关系的示意请见表 1。局部量在

各自子弧段内都是独立解算的。

表 1 复弧法的参数与弧长关系示意表

Tab. 1 The relationship schematic table about estimated parameters with arc's length in multiarc method

参数分类	待估参数个数	与各弧段对应的参数名											
全局量	6	轨道参数、测站坐标、与全局有关的动力学参数等											
局部量 1	8	类阻力系数 $C_d-1, C_d \cdot \dot{t}-1$				类阻力系数 $C_d-2, C_d \cdot \dot{t}-2$				...	...
局部量 2	8	太阳光压系数 $C_F-1, C_F \cdot \dot{t}-1$				太阳光压系数 $C_F-2, C_F \cdot \dot{t}-2$				...	...
局部量 3	4	地球反照辐射压系数 C_e-1				地球反照辐射压系数 C_e-2				...	...
局部量 4	72	RTN-1	RTN-2	RTN-3	RTN-4	RTN-5	RTN-6	...	...	...	...
局部量 5	12	地球质心位置-1						地球质心位置-2				...	...
局部量 6	60	Eop-1	Eop-2	Eop-3	Eop-4	Eop-5	Eop-6	Eop-7	Eop-8	Eop-9	Eop-10	...	...
局部量 7	40	Eop 高频部分-1	Eop 高频部分-2	Eop 高频部分-3	Eop 高频部分-4	Eop 高频部分-5	...	...	...	...	...	...	...
每个间隔长	—	3 d	3 d	3 d	3 d	3 d	3 d	3 d	3 d	3 d	3 d	...	...
全弧长	共 210 个	60 d											

注: 1. RTN 表示经验加速度 3 个分量; 2. Eop 表示地球定向参数的 3 个分量; 3. Eop 高频部分表示地球定向参数的周日项的顺行部分; 4. 地球质心位置是相对于几何参考坐标系的原点而言的。

4 结果与讨论

利用上面介绍的方法, 我们处理了 1993~2002 年 Lageos 卫星的激光测距资料, 归算了 EOP(SHA) 地球自转序列。以 60 d 为一弧段, 各弧段定轨收敛后的中误差 rms 好于 2 cm 见图 1。

近代空间大地测量结果而得到的, 具有较高的精度和系统稳定性。图 2 和图 3 显示了极移 (X_p, Y_p) 分量序列的比较, 很显然, 两者符合得很好。图 4 给出了日长变化序列的比较, 可见它们符合较好, 差别仅仅在于, 由于激光资料的密度不够, 还不能解算出日长中的高频部分。在此, 以 EOP (IERS) C04 序列作为参照标准, 我们解算结果的外符精度为: 日长变化 $Dr -0.03$ ms, 极移 $X_p -0.39$ mas, $Y_p -0.41$ mas。

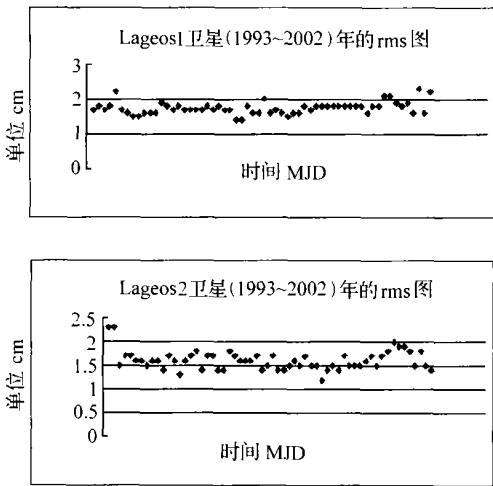


图 1 Lageos 卫星定轨的残差

Fig. 1 Orbit determine error of Lageos

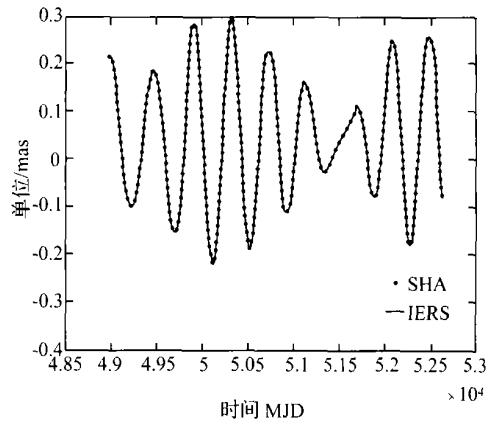


图 2 用 Lageos 卫星激光测距资料联合解算的极移分量 X_p (SHA) 与 EOP(IERS) X_p 的比较

Fig. 2 Comparison between the polar motion X_p series solved with the Lageos data during with the corresponding (IERS) EOP C04 series

这说明在定轨过程中我们采用的力学模型、多级复弧法及新的 EOP 解算模型是有效的。为了进一步检验解算的地球定向参数结果的可靠性, 我们将它与同期的 EOP(IERS) C04 序列相比较。EOP(IERS) C04 序列, 是 IERS 综合了多种

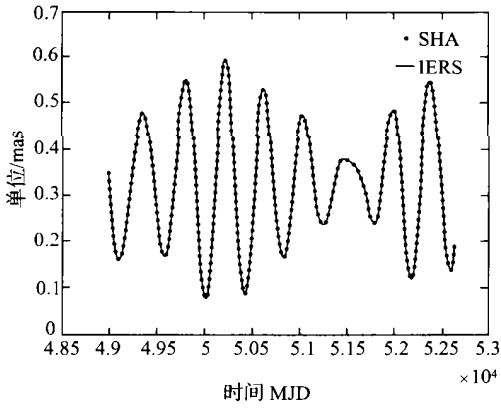


图 3 用 Lageos 卫星激光测距资料联合解算的极移分量 Y_p (SHA) 与 EOP(IERS) Y_p 的比较

Fig. 3 Comparison between the polar motion Y_p series solved with the Lageos data during with the corresponding (IERS) EOP C04 series

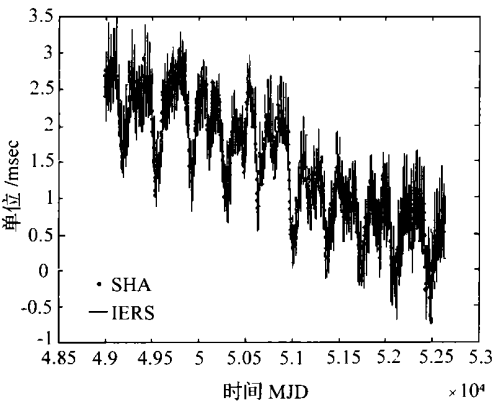


图 4 用 Lageos 卫星激光测距资料联合解算的 Dr (SHA) 日长变化与 Dr (IERS) 的日长比较

Fig. 4 Comparison between the length-of-day variation series solved with the Lageos data during Dr (SHA) with the corresponding Dr (IERS) series

地心变化趋势显示在图 5 中。从我们的计算结果可看出:

由于两颗卫星的轨道有差别, Lageos1 的轨道倾角为 11° , 为逆行轨道; 而 Lageos2 的轨道倾角为 52° , 是顺行轨道。它们联合解算可以在空间几何结构上起到互补作用, 同时可消除了资料的空间分布的影响。从 ΔX , ΔY 方向的变化都在 1 cm 左右, ΔZ 方向的变化在 3~ 4 cm 左右。它们的标准偏差分别为 ΔX , $\Delta Y \pm 0.5$ mm, $\Delta Z \pm 1.0$ mm。从这测得的结果可看出, 测地心变化除了较高的观测精度和较高的定轨精度外, 还与观

测资料的分布有关。

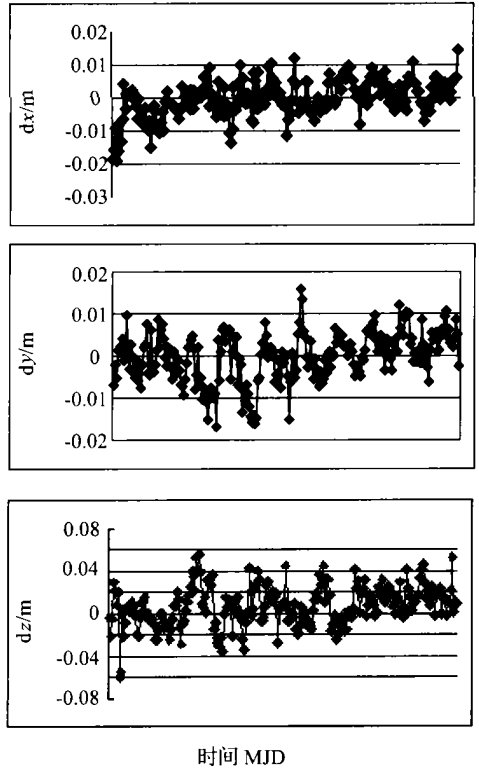


图 5 利用 Lageos 卫星 1993~ 2002 年激光测距资料联合解算地心的变化图

Fig. 5 The geocentric variance during 1993~ 2002 solved with Lageos1 SLR data

由此可知, 用 Lageos1, 2 两颗卫星的激光测距资料混合解算地心变化或测地球自转参数, 都比单颗卫星的要好。

致谢: 本工作得到廖新浩研究员的关心和帮助。

参考文献:

- [1] HU Xiao-gong, FENG Chu-gang, HUANG Cheng. The Covariance Analysis on the Sub-daily Term of Earth's Rotation with SLR[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 2000, 21(5): 12. (in Chinese)
- [2] TAPLEY B D. Statistical Orbit Determination Theory [A]. Proceedings of NATO Advanced Study Institute in Dynamical Astronomy[C]. Italy: Reidel Publishing Co. Dordrecht, 1976.
- [3] DANNIS D M. IERS Conventions, IERS Technical Note 21 July 1996 [R]. Paris: Central Bureau of IERS-Observatory of Paris, 1996.
- [4] FENG Chu-gang, et al. Improvement of Model Solving EOP with SLR Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(4): 289-292. (in Chinese)