

用 1998 - 2001 年 Lageos-1、Lageos-2 卫星激光测距资料估算地球定向参数

朱元兰 张飞鹏

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

利用上海天文台多星定轨的软件 (COMPASS), 对 1998 年 1 月 ~ 2001 年 12 月期间的 Lageos-1、Lageos-2 卫星的激光测距资料重新归算了地球定向参数 EOP (COMPASS), 并将结果与同期的 EOP (IERS) C04 进行了比较, 得到其外符精度为: 极移 $X_p - 0.32 \text{ mas}$, $Y_p - 0.34 \text{ mas}$, 日长变化 $D_r - 0.025 \text{ ms}$ 。

主题词: 激光测距 — 地球定向参数 — IERS

分类号: P228.5, P183.3

1 引 言

地球定向参数 (EOP) 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固参考系中的运动; 而世界时与协调时之差 UT1 - UTC 或日长变化则反映了地球自转的不均匀性。地球定向参数是飞行器精密定位和导航的重要参数, 它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定向参数具有重要的天文地球动力学意义^[1]。

Lageos-1 和 Lageos-2 卫星是专门用于地球动力学研究的被动卫星, 这两颗卫星的形状非常相似, 正球形, 直径相同, 质量也差不多, 轨道高度、周期基本相同, 但是轨道倾角不同, Lageos-1 的轨道是逆行的, Lageos-2 的轨道是顺行的。显然, 两颗卫星的观测资料在时间、空间上的分布方面比一颗卫星的要好 (单站的资料密度、卫星空间的分布、全球的分布等), 因此, 这两颗卫星用于测地, 会产生互补的作用, 减小了用单颗卫星的资料所产生的系统偏差, 利用这些特点, 以提高解算 EOP 的精度, 特别是外符精度。出于这样目的, 我们用多星定轨的软件 COMPASS (空间飞行器综合定轨与参数分析软件, Comprehensive Orbit determination and Parameter Analysis Software for Space vehicle) 对两颗 Lageos 卫星定轨, 同时解算公共参数, 如 SLR 台站的坐标、地球定向参数等。用 COMPASS 软件对 1998 年 1 月 ~ 2001 年 12 月 Lageos 卫星的激光测距资料重新归算地球定向参数 EOP 等, 从表 1 的结果看多星解的结果比单星解的精度要高。表 2 列出了两颗卫星的部分轨道参数。

表 1 多星解与单星解的结果比较

Table 1 The accuracies of comparisons of the results of 1 or 2 satellites with IERS

用 Lageos-1 卫星解的结果与 IERS(EOPC04) 比较的外符精度,使用的软件:SHORDE		用 Lageos-1、Lageos-2 卫星解的结果与 IERS(EOPC04) 比较的外符精度,使用的软件:COMPASS	
极移	$X_p - 0.35 \text{ mas}$	极移	$X_p - 0.32 \text{ mas}$
极移	$Y_p - 0.37 \text{ mas}$	极移	$Y_p - 0.34 \text{ mas}$
日长	$D_r - 0.032 \text{ ms}$	日长	$D_r - 0.025 \text{ ms}$

表 2 Lageos-1、Lageos-2 卫星的轨道情况

Table 2 The orbital information of the satellites of Lageos-1、Lageos-2

Name of satellite	inclination /(°)	eccentricity	height of perigee /km	height of apogee /km	period /(')
LAGEOS-1	109.84	0.0045	5850	5960	225
LAGEOS-2	52.64	0.0135	5652	5960	222

注:表 2 值取自:http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_mission/list_of_satellites/lageos.html

2 在多星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]进行。分析过程中采用的天文常数、参考系、力学模型和测量模型参照(1996)IERS 规范。具体情况如下:

力学模型:(1) 日月引力摄动;(2) 固体潮摄动;(3) 海潮摄动;(4) 地球形状摄动(EGM96 地球引力场模型);(5) 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);(6) 类阻力摄动(阻力系数 C_D 及变率 \dot{C}_D 待估);(7) 卫星热迟后辐射摄动;(8) 广义相对论效应;(9) 地球自转形变摄动;(10) 经验的以卫星轨道周期为周期的 RTN 摄动。

测量模型:(1) Marini-Murray 大气折射模型;(2) LAGEOS 卫星的归心改正:0.251m;(3) 固体潮引起的台站位移;(4) 永久潮汐项对台站的影响;(5) 海潮负荷潮对台站的影响;(6) 地球自转形变对台站的影响。

参考系:(1) 2000.0 平赤道($X - Y$ 平面)和平春分点(X 轴方向);(2) IAU76 岁差;(3) IAU1980 章动模型;加上 IERS 章动改正;(4) DE403/LE403 行星历表;(5) 地球参考架 ITRF2000,测站坐标由 ITRF2000 中的历元坐标和速度场求得。

解的收敛标准为卫星在 30 天轨道的初始位置的改正小于 1cm,同时 30 天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:

$$\begin{aligned}
 X_P(t) = & X_P(t_0) + \Delta X_{PC}(i) + [X_{P1P}(j) + X_{P1R}(j)] \cos\theta_g + \\
 & [Y_{P1P}(j) - Y_{P1R}(j)] \sin\theta_g + [X_{P2P}(j) + X_{P2R}(j)] \cos 2\theta_g + \\
 & [Y_{P2P}(j) - Y_{P2R}(j)] \sin 2\theta_g,
 \end{aligned} \quad (1)$$

对 Y_P 有:

$$\begin{aligned}
 Y_P(t) = & Y_P(t_0) + \Delta Y_{PC}(i) + [-X_{P1P}(j) + X_{P1R}(j)] \cos\theta_g + \\
 & [Y_{P1P}(j) + Y_{P1R}(j)] \sin\theta_g + [-X_{P2P}(j) + X_{P2R}(j)] \cos 2\theta_g + \\
 & [Y_{P2P}(j) + Y_{P2R}(j)] \sin 2\theta_g,
 \end{aligned} \quad (2)$$

对日长变化 D_R (亦即对 UT1 的计算) 有:

$$\begin{aligned}
 (UT1R - TAI)_i = & (UT1R - TAI)_{t_0} + D_{UTC}(i) \cdot [(t - t_0 - (i - 1) \cdot \text{arcdut})] + \\
 & du1c(j) \cdot \cos\theta_g + du1s(j) \cdot \sin\theta_g + \\
 & du2c(j) \cdot \cos 2\theta_g + du2s(j) \cdot \sin 2\theta_g.
 \end{aligned} \quad (3)$$

上述(1)至(3)式中有 15 个要解的参数: $[\Delta X_{PC}, \Delta Y_{PC}, X_{P1P}, X_{P1R}, Y_{P1P}, Y_{P1R}, X_{P2P}, X_{P2R}, Y_{P2P}, Y_{P2R}, D_{UTC}, du1c, du1s, du2c, du2s]$ 。其中: $X_{P1P}, X_{P1R}, Y_{P1P}, Y_{P1R}$ 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; $X_{P2P}, X_{P2R}, Y_{P2P}, Y_{P2R}$ 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。

两颗卫星的观测资料比单颗卫星的资料多,对周日和半周日部分根据资料的密度选择以三天的弧段来解。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。

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。

$$\begin{aligned}
 UT1_i = & ET_i - (ET - UT1)_i = ET_i - [(ET - TAI)_i - (UT1 - TAI)_i] \\
 = & ET_i - \{ (ET - TAI)_i - [(UT1R - TAI)_i + (35d \text{ 以下的短周期项})_i] \} \\
 = & ET_i - \{ (ET - TAI)_i - [(UT1R - TAI)_{t_0} + D_{UTC}(i) \cdot (t - t_0 - \\
 & (i - 1) \cdot \text{arcdut}) + du1c(j) \cdot \cos\theta_g + du1s(j) \cdot \sin\theta_g + \\
 & du2c(j) \cdot \cos 2\theta_g + du2s(j) \cdot \sin 2\theta_g + (35d \text{ 以下的短周期项})_i] \} .
 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中的 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, $(UT1R - TAI)_i$ 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:

$$\begin{aligned}
 (UT1R - TAI)_i = & (ut1r - tai)_k + \frac{[(ut1r - tai)_{k+1} - (ut1r - tai)_k]}{t_{k+1} - t_k} (t - t_k) + \\
 & D_{UTC}(i) \cdot (t - t_0 - (i - 1) \cdot \text{arcdut}) + D_{ulc}(j) \cos\theta_g + \\
 & D_{uls}(j) \sin\theta_g + D_{u2c}(j) \cos 2\theta_g + D_{u2s}(j) \sin 2\theta_g.
 \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式中的 $(ut1r - tai)_k, (ut1r - tai)_{k+1}$ 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。

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:

$$GST = GMST + \Delta\varphi\cos(\varepsilon_A + \Delta\varepsilon) + 0''.00264\sin\Omega + 0''.000063\sin2\Omega. \quad (6)$$

式中, $GMST$ 是格林尼治平恒星时; $\Delta\varphi$ 为黄经章动; ε_A 为平黄赤交角; $\Delta\varepsilon$ 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:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\varphi(\text{IAU 1980}) + \delta\Delta\varphi, \\ \Delta\varepsilon &= \Delta\varepsilon(\text{IAU 1980}) + \delta\Delta\varepsilon. \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\Delta\varphi(\text{IAU 1980})$ 、 $\Delta\varepsilon(\text{IAU 1980})$ 是根据 IAU 1980 模型求得的黄经章动和交角章动的值; $\delta\Delta\varphi$ 、 $\delta\Delta\varepsilon$ 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 $\delta\Delta\varphi$ 、 $\delta\Delta\varepsilon$ 对提高解日长变化率的精度是很有帮助的。

3 结果与讨论

整个分析过程采用多级复弧法,利用以上这些方法,用多星定轨软件(COMPASS)对两颗 Lageos 卫星定轨,同时解算公共参数,如 SLR 台站的坐标、地球定向参数,部分台站的距离偏差、时间偏差等。

用多星定轨软件(COMPASS)重新处理了 1998 ~ 2001 年 Lageos-1/2 卫星的激光测距资料,归算了 EOP 地球自转序列。以 30d 为一弧段,在解算过程中采用多级复弧法,卫星的轨道状态矢量作为全局量在 30d 内解算,类阻力系数及其变化率、太阳光压系数及其变化率作为一级局部量在 10d 内独立解算,地球定向参数(X_p 、 Y_p 、 D_r)包括(ΔX_{PC} 、 ΔY_{PC})等 15 个参数和 RTN 方向的经验加速度作为二级局部量在 3d 内解算。各弧段定轨收敛后的中误差 rms 在 1cm 左右,表 3 分别列出了每个弧段的起始时刻和结束时刻、两颗卫星的定轨收敛后观测资料数以及各弧段定轨收敛后的中误差 rms、单颗卫星定轨收敛后观测资料数及定轨收敛后中误差 rms,(由于表 3 序列太长只列出一部分的结果),从表 2、3 可见两颗卫星的观测资料在时间、空间上的分布(单站的资料密度、卫星在空间的分布、全球测站的分布等)比一颗卫星的要好。两颗卫星用于测地,会产生互补的作用,可减少用单颗卫星的资料所产生的系统偏差,利用这些特点,可以提高解算 EOP 的精度,特别是外符精度。实际结果表明确实如此。

表 3 1998 - 2001 年各弧段观测资料数与定轨的残差统计

Table 3 The statistics of observation numbers and orbital residuals in every arc

time of arc starting-ending	Lageos-1、Lageos-2		Lageos-1	
	Observation numbers	rms/m	Observation numbers	rms/m
98/01/01 - 98/01/30	10200	0.0194	5412	0.0184
98/01/31 - 98/03/01	15346	0.0116	7445	0.0118
98/03/02 - 98/03/31	12854	0.0130	5435	0.0130
98/04/01 - 98/04/30	8828	0.0135	3034	0.0128
98/05/01 - 98/05/30	9325	0.0122	3397	0.0113
98/05/31 - 98/06/29	8341	0.0133	4262	0.0127
98/06/30 - 98/07/29	9976	0.0118	5944	0.0112
98/07/31 - 98/08/28	11598	0.0117	6957	0.0111
98/08/29 - 98/09/27	9075	0.0110	5323	0.0110
98/09/28 - 98/10/27	9589	0.0113	4700	0.0114
98/10/28 - 98/11/26	8326	0.0098	3852	0.0105
98/11/27 - 98/12/27	7138	0.0107	3473	0.0106
98/12/24 - 99/01/23	9001	0.0115	4753	0.0114
99/01/20 - 99/02/19	9377	0.0124	5021	0.0123
99/02/17 - 99/03/17	11402	0.0132	6496	0.0139
99/03/17 - 99/04/16	9855	0.0112	5662	0.0118
99/04/14 - 99/05/13	10829	0.0116	5206	0.0122
99/05/12 - 99/06/11	11222	0.0144	4699	0.0172
99/06/11 - 99/07/10	10936	0.0146	4147	0.0182
99/07/07 - 99/08/05	11280	0.0123	3929	0.0115
99/08/05 - 99/09/04	9709	0.0115	4445	0.0112
99/09/02 - 99/10/01	12188	0.0115	5718	0.0111
99/10/01 - 99/10/30	14851	0.0119	7334	0.0118
99/10/29 - 99/11/28	14166	0.0115	7006	0.0113
99/11/23 - 99/12/22	14647	0.0126	7708	0.0122
99/12/21 - 00/01/20	8873	0.0131	4365	0.0125
00/01/17 - 00/02/16	13236	0.0120	6228	0.0111
00/02/15 - 00/03/16	10392	0.0112	4382	0.0100
00/03/14 - 00/04/13	9888	0.0108	4921	0.0103

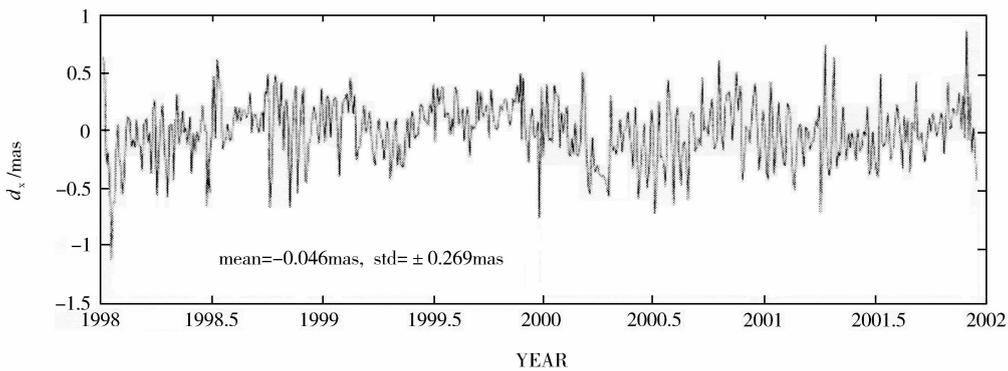
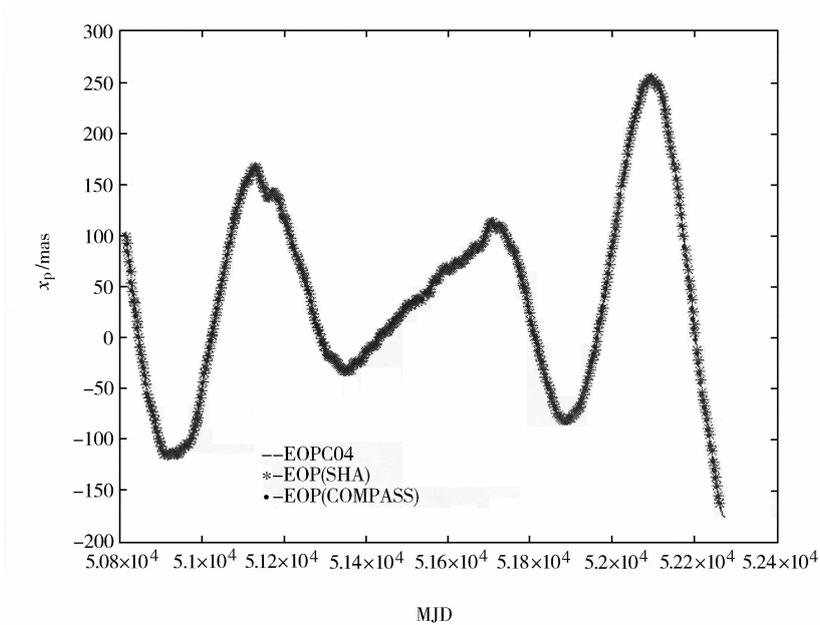


图 1 用 Lageos 卫星激光测距资料联合解算的极移分量 X_p (SHA)、 X_p (COMPASS) 与 EOP(IERS) X_p 比较

Fig. 1 Comparison between the polar motion X_p (SHA)、 X_p (COMPASS) series solved with the Lageos data duringwith the corresponding (IERS) EOP C04 series

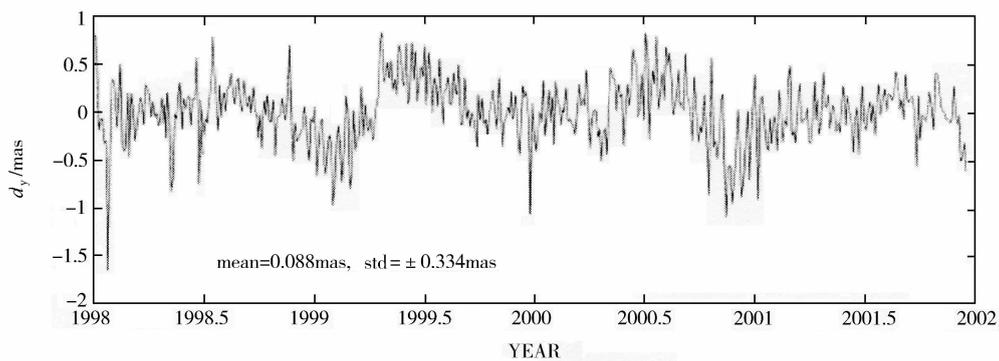
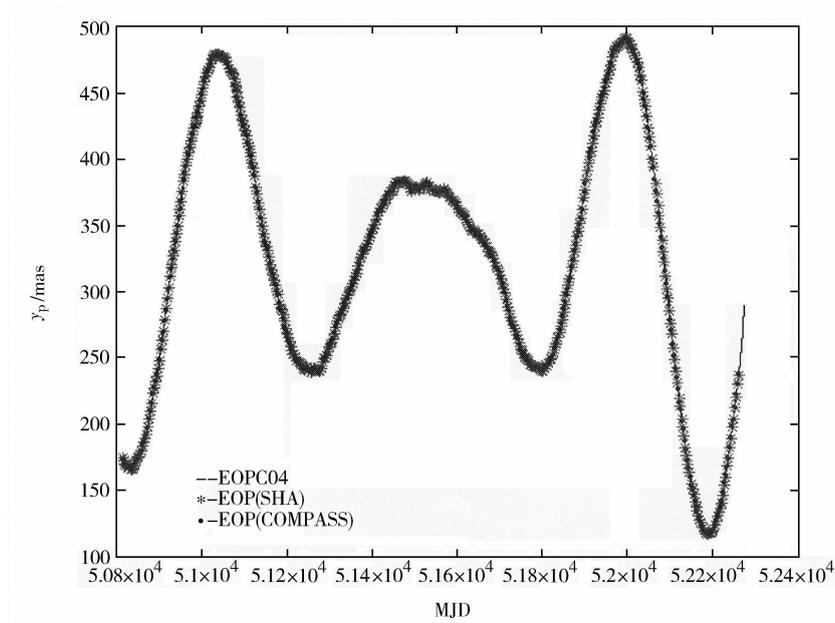


图 2 用 Lageos 卫星激光测距资料联合解算的极移分量 Y_p (SHA)、 Y_p (COMPASS) 与 EOP(IERS) Y_p 比较

Fig. 2 Comparison between the polar motion Y_p (SHA)、 Y_p (COMPASS) series solved with the Lageos data duringwith the corresponding (IERS) EOP C04 series

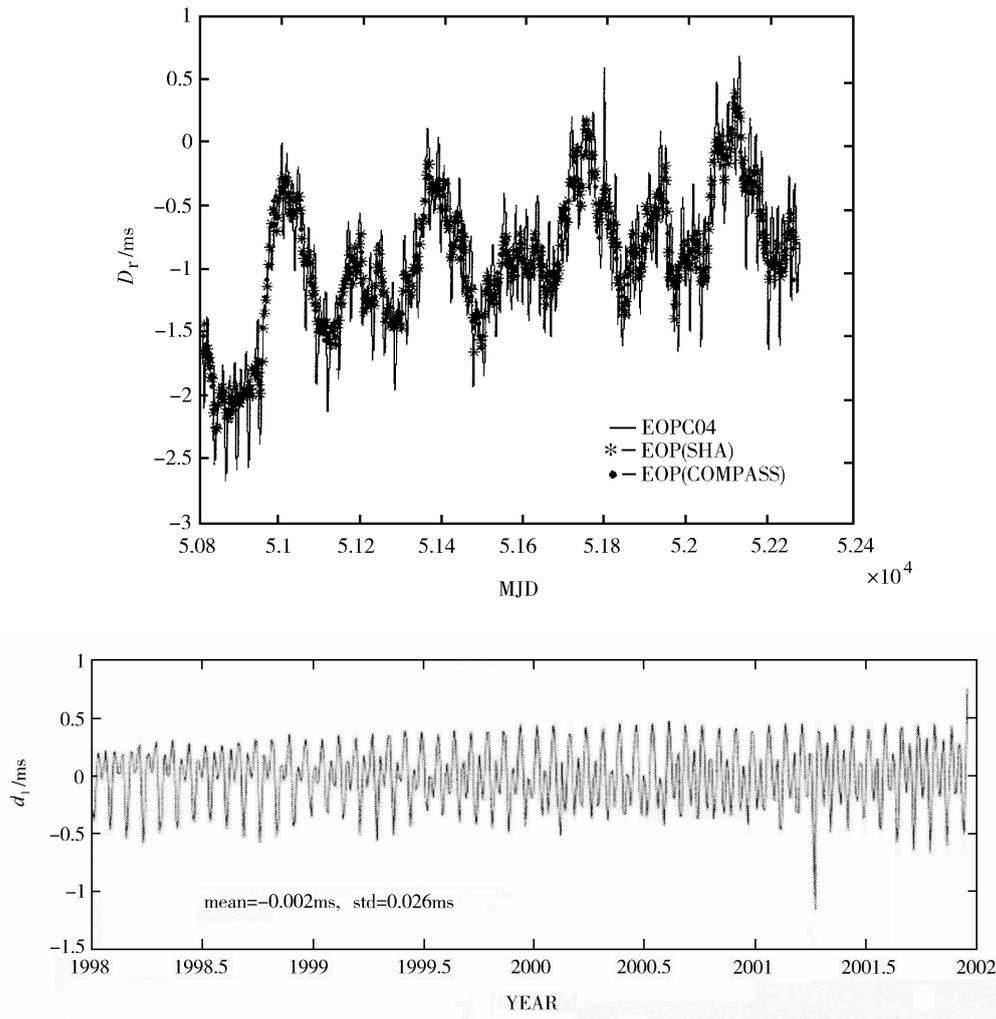


图 3 用 Lageos 卫星激光测距资料联合解算的 D_r (SHA)、 D_r (COMPASS) 日长变化与 D_r (IERS) 的日长比较

Fig. 3 Comparison between the length-of-day variation series solved with the Lageos data during D_r (SHA)、 D_r (COMPASS) with the corresponding D_r (IERS) series

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。由于计算 EOP 的序列较长,只用图的形式表示,以及给出外符的精度。图 1 和图 2 显示了极移 (X_p 、 Y_p) 分量序列的比较,图 3 给出了日长变化序列的比较,图 1 - 3 中实线“—”表示 EOP(IERS)序列,星号“*”表示单星用 SHORDE 软件解算的结果 EOP(SHA),圆点“•”表示用多星定轨软件 (COMPASS) 解算的结果 EOP(COMPASS),图中的 d_x 、 d_y 、 d_l 分别是用多星解算的 EOP(COMPASS) 与 EOP(IERS) 的差值,rms 是均值,std 是精度。从图可看出,三种极移序列非常吻合,日长变化的高频部分有差别,主要是由于 SLR 观测资料少,对解算日长高频部分没有 VLBI、GPS 的好。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 D_r ± 0.025 ms,极移 X_p ± 0.32 mas, Y_p ± 0.34 mas。

参 考 文 献

- [1] 胡小工, 冯初刚, 黄城. 中国科学院上海天文台年刊, 2000, 21: 5 ~ 12
- [2] Tapley B D. Proceeding of NATO Advancoel Study Institute in Dynamical Astronomy, Cortina d' Am Italy, Dordrechr; Reidel Publishing Co. 1976
- [3] Dannis D M. IERS TECHNICAL NOTE 21, 1996
- [4] Feng chugang *et al.* Acta Geodaetica, 2003, 32(4): 289 ~ 292 (in Chinese)

EARTH ORIENTATION PARAMETER DURING 1998 – 2001 SOLVED WITH LAGEOS-1、LAGEOS-2 SLR DATA

ZHU Yuan-lan ZHANG Fei-peng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

Using Shanghai Astronomical Observatory COMPASS software, we solve the Earth Orientation Parameter (EOP) using the Lageos Satellite Laser Range (SLR) data from 1998 to 2001. The results are compared with EOP(IERS)C04 during the same period. The EOP(COMPASS) shows the consistency of $X_p - 0.32\text{mas}$, $Y_p - 0.34\text{mas}$ for the polar motion and $D_r - 0.025\text{ms}$ for the length-of-day (LOD) variation.

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