第 44 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.44 No.2
2003 年 5 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2003

用 lageos1 和 lageos2 激光测距资料联合解地球定向参数*

冯初刚 朱元兰 张飞鹏

(中国科学院上海天文台 上海 200030)
(中国科学院国家天文台 北京 100012)
(中国科学院天文地球动力学研究中心, 中国科学院天文地球动力学联合研究中心)

摘要 为了响应国际地球自转服务中心 (IERS) 和国际激光测距服务中心 (ILRS) 的呼吁, 上海天文台天文地球动力学研究中心参加了对激光测距卫星 lageos1 、 lageos2 的资料的分析、计算, 提交了关于地球定向参数 (EOP) (1998-2001) 的联合 (lageos1 、 lageos2) 解算结果报告: (SHAO) 2002 L 01. 利用更精细化的和改正了的计算 EOP 的模型, 获得了 EOP (SHAO) 2002 L 01 系列. 该系列与同时期的 IERS 的 EOP (IERS) C 04 相比, 符合程度: 极移 Xp 、 Yp 好于 0.35 mas, 日长变化 Du 好于 0.030 ms.

关键词 卫星动力学, 激光测距, 地球定向参数
中图分类号: P 13

1 引言

1976 年 5 月和 1992 年 10 月分别发射了 lageos1 和 lageos2, 它们是两颗装有激光后向反射器、用激光观测、专门用于地球动力学研究的被动卫星. lageos1 和 lageos2 卫星的形状非常相似, 正球形, 直径一样, 质量差不多, 轨道高度、周期基本一样. 但是, 轨道倾角不一样, lageos1 的轨道是逆行的, lageos2 的轨道是顺行的. 关于 lageos 卫星及其轨道信息可见表 1 、表 2. 两颗卫星的观测资料在时间、空间上的分布总比一颗卫星的要好 (单站的资料密度、卫星在空间的分布、全球测站的分布等). 因此, 这两颗卫星联合用于测地, 会产生互补的作用, 减少用单颗卫星的资料所产生的系统偏差. 我们用 lageos1 和 lageos2 卫星的激光测距资料 (SLR) 联合解地球定向参数 (EOP), 正是希望利用这些特点, 以利于提高解算 EOP 的精度, 特别是外符精度. 本文的工作仅是多星联合解 EOP 的一个初步试验.

2002-06-26 收到

* 地震科学工程中国地震运动观测网 981602 、国家攀登项目二级课题全国地震运动监测网和 GPS 测轨网研究 970231003 、中国科学院知识创新工程重要方向性项目 “空间对地观测与应用研究” 课题、 “空间飞行器精密测轨与定轨研究”(KJCX2-SW-T1) 和国家自然科学基金 (40174008) 资助项目

表 1 表 1 lageos1 、 2 卫星的几何形状和尺寸

Table 1 geometical shape and size of the satellites of Lageos1, 2

Name of satellite	dia. of satellite	retro-reflector	shape	mass (kg)
LAGEOS-1	60 cm(24 in)diameter sphere	426 corner cubes	Sphere	411
LAGEOS-2	60 cm (24 in)diameter sphere	426 corner cubes	Sphere	405

表 2 lageos1 、 2 卫星的轨道情况

Table 2 The orbital information of the satellites of Lageos1, 2

Name of satellite	inclination	eccentricity	high of perigee	high of apogee	period
LAGEOS-1	109.84°	0.0045	5,850(km)	5,960(km)	225(″)
LAGEOS-2	52.64°	0.0135	5,625(km)	5,960(km)	222(″)

注： lageos1 和 lageos2 信息是从
http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/lageos.html 获得.

2 计算准则

整个处理过程遵照统计轨道原理 [1]. 分析过程采用的天文常数、参考系、力学模型和测量模型均参照 IERS 规范 [2].

参考系： (1) J2000.0 的平赤道 ($x-y$ 平面) 和平春分点 (x 轴方向)； (2) 站坐标和站运动速度采用 ITRF2000； (3)IAU1976 岁差模型， 1980 章动模型和 IERS 章动改正; (4)DE403/LE403 行星历表.

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 (JGM3 地球引力场模型)； (5) 太阳光压和地球辐射压摄动； (6) 类阻力摄动； (7) 广义相对论摄动； (8) 地球自转形变摄动； (9) 经验的 RTN 摄动； (10) 对 lageos1 另加上热传导辐射摄动.

测量模型： (1)Marini-Murray 大气折射； (2)LAGEOS 卫星的归心改正： 0.251 米; (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； (7) 广义相对论改正.

整个分析过程采用多级复弧法 [3]. 多级复弧法的解参数与弧段关系的示意请见表 3. 局部量在各自子弧段内都是独立解算的. 解的收敛标准为卫星在 60 天轨道的初始位置的改正小于 1 厘米或 60 天内观测残差相对于预报残差的相对误差小于 0.01.

表 3　复弧法的参数与弧长关系示意表

Table 3　The relationship schematic table about estimated parameters with arc's length in multiarc-method

type of parameters	number of parameters	corresponding names estimated parameters in every arc										
global	6	orbital elements, site's coordinates, dynamical parameters										
local 1	8	like-drag parameters Cd-1, Cd-dot-1					like-drag parameters Cd-2, Cd-dot-2					... ...
local 2	8	solar radiation pressure Cr-1, Cr-dot-1					solar radiation pressure Cr-2, Cr-dot-2					... ...
local 3	4	earth radiation pressure Ce-1					earth radiation pressure Ce-2					... ...
local 4	72	RTN-1	RTN-2	RTN-3	RTN-4	RTN-5	RTN-6					... ...
local 5	12	positions of the earth mass-1					positions of the earth mass-2					... ...
local 6	60	Eop-1	Eop-2	Eop-3	Eop-4	Eop-5	Eop-6	Eop-7	Eop-8	Eop-9	Eop-10	... ...
local 7	40	Eop of high frequency(1)	Eop of high frequency(2)	Eop of high frequency(3)	Eop of high frequency(4)	Eop of high frequency(5)						... ...
gap of every arc	——	3 day	3 day	3 day	3 day	3 day	3 day	3 day	3 day	3 day	3 day	... ...
length of full arc	total 210	60 day										

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.

Note: 1. RTN are empirical rtn accelerations; 2.Eop is the earth orientation parameters; 3.High frequency of Eops is diurnal prograde components of the earth orientation parameters; 4.The position of the earth mass is with respect to the origin of the geometric reference system of coordinates.

在用 Lageos 卫星的 SLR 资料解 EOP 时，用的数学模型是：

对 Xp 有：

$$\begin{aligned} Xp(t) &= Xp(t)_0 + \Delta Xpc(i) + [Xp_{1P}(j) + Xp_{1R}(j)]\cos\theta_g + [Yp_{1P}(j) - Yp_{1R}(j)] \\ &\quad \sin\theta_g + [Xp_{2P}(j) + Xp_{2R}(j)]\cos 2\theta_g + [Yp_{2P}(j) - Yp_{2R}(j)]\sin 2\theta_g . \end{aligned} \tag{1}$$

对 Yp 有：

$$\begin{aligned} Yp(t) &= Yp(t)_0 + \Delta Ypc(i) + [-Xp_{1P}(j) + Xp_{1R}(j)]\cos\theta_g + [Yp_{1P}(j) + Yp_{1R}(j)] \\ &\quad \sin\theta_g + [-Xp_{2P}(j) + Xp_{2R}(j)]\cos 2\theta_g + [Yp_{2P}(j) + Yp_{2R}(j)]\sin 2\theta_g . \end{aligned} \tag{2}$$

对日长变化 D_R (亦即对 $UT1$ 的计算) 有：

$$\begin{aligned} (UT1R - TAI)_t &= (UT1R - TAI)_{t0} + D_{UTC}(i)^*[(t - t_0 - (i-1)^*\mathrm{arc\,dut})] + du1c(j)^* \\ &\quad \cos\theta_g + du1s(j)^*\sin\theta_g + du2c(j)^*\cos 2\theta_g + du2s(j)^*\sin 2\theta_g . \end{aligned} \tag{3}$$

上述 (1) 至 (3) 式表明有 15 个要解的参数：

[ΔXpc 、 ΔYpc 、 Xp_{1P} 、 Xp_{1R} 、 Yp_{1P} 、 Yp_{1R} 、 Xp_{2P} 、 Xp_{2R} 、 Yp_{2P} 、 Yp_{2R} 、 D_{UTC} 、 $du1c$ 、 $du1s$ 、 $du2c$ 、 $du2s$].

其中：

Xp_{1P} 、 Xp_{1R} 、 Yp_{1P} 、 Yp_{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;

Xp_{2P} 、 Xp_{2R} 、 Yp_{2P} 、 Yp_{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, ΔXpc 、ΔYpc 、$D_{\rm UTC}$ 是在 3 天弧段里解的, 那么, 周日和半周日部分应该根据资料的密度选择比 3 天长的弧段来解, 一般选 6 天或 8 天的弧段. 所以, 在多级复弧法中, ΔXpc 、 ΔYpc 、$D_{\rm UTC}$ 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在解算 EOP 的过程中时间的计算, 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) 和 UT1(世界时).

$$\begin{aligned} UT1_t \;=\;& ET_t-(ET-UT1)_t= \\ & ET_t-[(ET-TAI)_t-(UT1-TAI)_t]= \\ & ET_t-\{(ET-TAI)_t-[(UT1R-TAI)_t+(\text{35天以下的短周期项})_t]\}= \\ & ET_t-\{(ET-TAI)_t-[(UT1R-TAI)_{t0}+ \\ & D_{\rm UTC}(i)^*(t-t_0-(i-1)^*arcdut)+ \\ & du1c(j)^*\cos\theta_g+du1s(j)^*\sin\theta_g+ \\ & du2c(j)^*\cos 2\theta_g+du2s(j)^*\sin 2\theta_g+(\text{35天以下的短周期项})_t]\} \end{aligned} \tag{4}$$

(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 $(UT1R-TAI)_{t0}$ 处理:

$(UT1R-TAI)_{t0}$ 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:

$$\begin{aligned} & (UT1R-TAI)_t=(ut1r-tai)_k+\frac{[(ut1r-tai)_{k+1}-(ut1r-tai)_k]^*}{t_{k+1}-t_k}(t-t_k)+ \\ & D_{\rm UTC}(i)^*(t-t_0-(i-1)^*\text{arc dut})+D_{U1C}(j)\cos\theta_g+D_{U1S}(j)\sin\theta_g+ \\ & D_{U2C}(j)\cos 2\theta_g+D_{U2S}(j)\sin 2\theta_g \end{aligned} \tag{5}$$

(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 $D_{\rm UTC}(i)$ 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．(1) 、(2) 式中的 $Xp(t_0)$ 、$Yp(t_0)$ 也可仿照 $(UT1R-TAI)_{t0}$ 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.

3　观测资料

观测资料是从 ILRS 的网站上下载的．所用 lageos1 和 lageos2 的资料 (1998-2001) 统计见表 4. 同时各测站观测资料的权重也列在表 4 中．其中个别的站有时有例外，如 7105 、 7080 有时有很大的误差，在这种时候 7105 、 7080 站的权一般调整为 10 或 1, 同时解它们的偏差．类似的站还有 7090 、 7832 、 7837 等．各站的权根据各观测站的资料的质量 (资料的精度、稳定性等因素) 决定，当然带有一定的主观随意性．如亚洲的测站虽然观测资料的质量不如欧美，但是从地域分布上考虑，适当提高了它们的权.

为了方便起见，每段资料分为 60 天 1 段，每年的最后 1 段就为 65 或 66 天．而解 EOP 则是 3 天弧长，这样一般每段资料可解得 20 个 EOP, 每年的最后 1 段可解得 22 个 EOP. 由此引起的每年最后的 5 、 6 天中的解 EOP 不稳定，则由另外组合 1 跨年度的 60 天弧段来替代．每个弧段的资料数见表 4. 表 4 中包括了各测站资料最后的解算残差的均方值．其中资料统计数只包括了好的观测资料 (观测资料残差优于 0.12 米).

表 4　全球激光观测站 1998-2001 观测及定轨残差统计表

Table 4　The statistics of observations and orbital residuals of SLR stations in all over the world

No.	lageos1		Lageos2		site's weight
	observation	rms(m)	observation	rms(m)	
63	2	0.081	0	0.000	1.000
1864	1411	0.037	1652	0.045	11.111
1868	456	0.049	323	0.051	2.778
1873	103	0.058	162	0.058	1.000
1884	4831	0.038	3044	0.039	1.000
1893	796	0.038	1087	0.040	1.000
7080	10251	0.017	12773	0.014	400.000
7090	25615	0.016	29714	0.014	400.000
7105	19323	0.017	16342	0.013	400.000
7110	26972	0.016	26489	0.014	400.000
7130	7	0.036	0	0.000	2.778
7210	5102	0.018	6123	0.018	400.000
7231	200	0.070	661	0.072	2.778
7236	75	0.056	54	0.056	2.778
7237	8387	0.026	7515	0.025	100.000
7249	2217	0.043	1917	0.041	1.000
7308	0	0.000	132	0.034	2.778

表 4 (续)

Table 4 (continude)

No.	lageos1		Lageos2		site's weight
	observation	rms(m)	observation	rms(m)	
7328	1978	0.024	2191	0.020	100.000
7335	1887	0.023	1734	0.021	100.000
7337	1051	0.023	1209	0.020	100.000
7339	2936	0.023	2969	0.022	100.000
7343	141	0.054	19	0.060	2.778
7403	5058	0.026	4816	0.026	1.000
7501	139	0.060	228	0.059	100.000
7548	284	0.051	429	0.054	1.000
7594	168	0.022	272	0.01	100.000
7806	2682	0.023	803	0.025	1.00000
7811	6259	0.024	3844	0.023	100.000
7820	2420	0.036	2590	0.037	25.000
7824	749	0.058	577	0.050	2.778
7831	284	0.029	222	0.028	100.000
7832	3115	0.051	3536	0.049	100.000
7835	15825	0.016	13776	0.014	400.000
7836	6770	0.018	4041	0.016	100.000
7837	3599	0.047	4556	0.044	100.000
7838	4363	0.031	5256	0.029	100.000
7839	22588	0.016	18846	0.014	400.000
7840	25675	0.015	19744	0.013	400.000
7843	3022	0.037	2659	0.032	44.444
7845	9167	0.017	9078	0.016	400.000
7849	18521	0.016	18517	0.015	400.000
7939	3903	0.051	3120	0.052	11.111
8834	11174	0.024	9109	0.023	100.000
total	274783	0.018	253053	0.016	weight

4 结果及讨论

对 lageos 卫星 60 天弧长定轨残差统计见表 5. 从表 5 可知各弧定轨后观测残差均方值均好于 2 厘米. 这些值反应了定轨精度. 同时表明在定轨过程中采用的力学模型、多级复弧法及新的 EOP 解算模型是有效的.

计算 EOP 结果太长, 因此不能在此列出. 但是 4 年的结果可从网上查得, 网址为: IERS Analysis Campaign to align EOPs to ITRF2000 / ICRF. 这里只列出解算结果与 EOP (IERS) C 04 的比较结果, 具体见表 6. 两个 EOP 系列的比较参见文献 [4]. EOP (IERS) C 04 是 IERS 根据全球各种技术的分析中心提供的 EOP 系列重新联合处理得到的 EOP 系列. EOP (IERS) C 04 在 1996 年以后的精度 Xp 为 0.2(mas), Yp 为 0.2(mas), Du 为 0.02(ms). 在此把它作为参照标准.

表 5　1998—2001 各弧段观测及定轨残差统计

Table 5　The statistics of observations and orbital residuals in every arc

time of arc	Lageos1		Lageos2	
starting—-ending	observation	rms(m)	observation	rms(m)
98/01/01—03/01	12671	0.019970	12971	0.017304
98/03/02—04/30	13123	0.016457	8580	0.014438
98/05/01—06/29	10444	0.016896	8138	0.014208
98/06/30—08/28	9442	0.015649	13114	0.014620
98/08/29—10/27	9171	0.014692	9166	0.016140
98/10/28—12/31	8592	0.015999	7136	0.015710
99/01/01—03/01	8548	0.016359	10118	0.016884
99/03/02—04/30	9332	0.018217	11118	0.015367
99/05/01—06/29	12067	0.017670	8321	0.015322
99/06/30—08/28	13313	0.018046	7677	0.012388
99/08/29—10/27	13163	0.018298	12342	0.014578
99/10/28—12/31	13440	0.018060	14127	0.015262
00/01/01—02/29	11864	0.017667	10115	0.014080
00/03/01—04/29	9079	0.017743	9057	0.016639
00/04/30—06/28	9091	0.016797	13512	0.015250
00/06/29—08/27	9294	0.016031	13267	0.014983
00/08/28—10/26	10857	0.015672	7854	0.014830
00/10/27—12/31	9964	0.017550	10067	0.015557
01/01/01—03/01	9062	0.016218	9421	0.016552
01/03/02—04/30	14204	0.017668	7285	0.015100
01/05/01—06/29	22010	0.017938	9430	0.016967
01/06/30—08/28	13101	0.020502	15168	0.017520
01/08/29—10/27	11978	0.021336	14585	0.019674
01/10/28—12/31	10973	0.018765	10484	0.019273

由于单颗 lageos 卫星的定轨精度较过去有较大提高，因此从 lageos1 或 lageos2 单独解得的 EOP 参数的精度也相应的提高了 [5]. 它们与 EOP（ IERS ） C 04 相比较的结果列于表 6, 表 6 的 L1 和 L2 所在的行具体反应了它们各自比较的结果.

本文的联合解只是将 lageos1 和 lageos2 各自结果的加权平均. 各自的权因子的确定取自解 EOP 的每个子弧的观测数除以该子弧的残差均方值的平方.

表 6 的 L1+L2 所在的行具体反应了 lageos1 和 lageos2 联合解得的 EOP 参数与 EOP（ IERS ）C 04 的比较结果. 从表 6 可见, 联合解的 EOP 最接近 IERS 的 EOP（ IERS ）C 04 系列, 明显好于 lageos1 和 lageos2 各自单独解的结果. 这说明用 SLR 资料解算 EOP 时， Lageos1 、 Lageos2 联合解 EOP 比单颗卫星解 EOP 要好. 正如本文前言中所说的那样，用这两颗卫星联合测 EOP, 会产生互补的作用，减少了用单颗卫星的资料所产生的系统偏差.

如果对 lageos1 和 lageos2 的资料严格地同步定轨，同步解，亦即严格意义上的联合解，那么解得的 EOP 精度还会提高，定轨精度也会提高.

表 6 Lageos1 、 Lageos2 联合解 EOP 、各独立解 EOP 与 eopc04 拟合程度

Table 6 Goodness of fitting every result(EOP) from Lageos1 , Lageos2 with EOP(IERS) C 04

Result type	Xp fitting precision(mas)	Yp fitting precision(mas)	Du fitting precision(ms)
L1	0.467	0.437	0.035
L2	0.486	0.537	0.040
L1+L2	0.347	0.351	0.028

参 考 文 献

1 Tapley B D. Statistical Orbit Determination Theory, Proceading of NATO Advancoel Study Institute in Dynamical Astronomy, Cortina d' Am Italy, Reidel Publishing Co. Dordrechr, 1976

2 Dannis D. McCarthy, IERS Conventions , IERS TECHNICAL NOTE 21 July 1996, Central Bureau of IERS - Observatory of Paris, F-75014 PARIS – France, 1996

3 He Miaofu, Zhu Wenyao, Feng Chugang. Celestial Mechanics, 1989, 45, 61-64

4 ZHU Sheng-yuan et al. AcASn, 1985, 26(4): 347-354

5 ZHU Wen-yao et al. AcASn, 1989, 30(3): 294-309

The Determination of EOP from the SLR Data of Combining lageos1 and lageos2

FENG Chu-Gang ZHU Yuan-Lan ZHANG Fei-Peng

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

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

(*Center for Astro-Geodynamical Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200030*)

Abstract As a reponse for the appeal of International Earth Rotation Service (IERS) and International Laser Ranging Service (ILRS), Center for Astro-Geodynamical Research, Shanghai Astronomical Observatory (SHAO) processed the combination of analyzing and computing Satellite Laser Ranging (SLR) data of lageos1 and lageos2 in the determination of Earth Orientation Parameters (EOP). SHAO submitted the report with respect to EOP between 1998 and 2001 combining lageos1 and lageos2: (SHAO) 2002 L 01, in which the process, the model computing EOP was updated and refined.

The series was compared with EOP (IERS) C 04 at the same time. The goodnesses of them are respectively: Xp and Yp are superior to 0.35 mas, Length of Day (LOD) is superior to 0.30 ms.

Key words Satellite dynamics, Satellite Laser Ranging (SLR), Earth Orientation Parameters (EOP)