

基于 SLR 精密轨道的天文定位精度分析*

孙明国^{1†} 刘承志¹ 范存波¹ 赵 罂^{1,2,3} 李振伟¹ 梁智鹏¹

(1 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 长春 130117)

(2 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 利用全球卫星激光测距服务系统 (ILRS, International Laser Ranging Service) 标准点资料对 Ajisai 卫星进行精密定轨, 残差均方根 (RMS) 优于 3 cm, 得到该星的精密轨道。进而对长春站 40 cm 空间碎片光电望远镜获得的 Ajisai 卫星的天文定位资料进行精度分析, 外符合精度约 3" 左右。单独利用天文定位数据进行轨道改进, 内符合精度优于 3"。改进轨道的 x 、 y 、 z 坐标 3 分量在观测数据覆盖范围内的精度在 100 m 之内。同样地对 Jason-1 卫星作数据分析, 结果和 Ajisai 卫星精度相当。分析各个弧段的精度变化, 发现定标星个数减少, 会导致天文定位精度下降。据此提出可以把最少定标星比例作为评定数据质量的参考指标之一。

关键词 航天器, 天体力学: 轨道计算与定轨, 方法: 数据分析

中图分类号: P 123; 文献标识码: A

1 引言

光电望远镜对空间目标跟踪定位可采用两种方法: 轴系定位和天文定位^[1]。天文定位是指利用图像采集系统采集空间目标及背景恒星的图像, GPS 时间分系统给计算机提供时间信息, 经过星点提取和星图匹配, 获取目标相对于恒星的位置信息^[2]。与轴系定位方法相比, 天文定位方法不受望远镜置平及南北指向误差、大气折射改正不严格等因素的影响, 提高了定位精度, 是新一代光电望远镜测定空间目标采用的主要方法。实时掌握天文定位精度, 对望远镜的稳定运行和精度改进都有重要意义。通常有两种评定标准评估望远镜的测量精度: 内符合标准和外符合标准。内符精度, 即用轨道拟合或轨道改进后残差的均方根 (中误差) 来表示^[3]。外符精度一般用其它得到认可的定轨方法, 例如用 GPS 定位或卫星激光测距 (SLR, satellite laser ranging) 的定轨结果和观测数据作比较, 或者用自己定出的前后弧段交点处的轨道之差的均方根表示。目前国内外很多研究机构如 CSR (Center for Space Research)、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 等对于卫星激光测距的定轨精度达 cm 级甚至亚厘米级^[4-5]。以 SLR 精密轨道作为外符合评定标准, 评定结果较为准确和可靠。

2011-09-02 收到原稿, 2011-10-19 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11073033) 资助

† sunmg@cho.ac.cn

本文分以下几步对长春站 40 cm 空间碎片望远镜的天文定位数据进行精度分析: (1) 利用全球卫星激光测距服务系统标准点数据, 对 Ajisai 卫星和 Jason-1 卫星进行精密定轨。把激光测距的精密轨道作为理论真轨道。通过坐标变换得到天文定位的理论值。 (2) 通过比较天文定位观测值和理论值的差别, 得到外符合精度。 (3) 单独利用长春站 40 cm 光电望远镜的观测数据, 对目标星进行轨道优化, 得到其内符合精度。 (4) 比较光学定位轨道和 SLR 精密轨道的差别, 直观地看出天文定位的定轨精度。 (5) 分析天文定位精度随定标星个数不同而产生的变化, 并作出总结。

2 卫星激光测距精密定轨

2.1 目标星的选择

作为外符合评定中的目标星应满足以下几个条件: 星等一般不低于 3 mag; 属 ILRS 空间计划观测目标; 国内 SLR 网能正常观测。日本国家宇宙开发局 (JAXA) 1986 年 8 月 12 日发射的 Ajisai 卫星特征为: 正球形、直径 214 cm、有立体角后向反射棱镜和平面反射镜、轨道高度 1 500 km, 卫星亮度 1.5~3.5 mag。它的优点是: 亮度大, 在激光测距卫星中, 该星最容易观测; 该星为被动型卫星、没有轨道机动、结构简单、易于精密定轨。因此选定 Ajisai 卫星为目标星。

美国宇航局 (NASA) 和法国国家空间研究中心 (CNES) 2001 年 12 月 7 日发射的 Jason-1 卫星特征为: 非球形、近地点高度 1 336 km、卫星亮度 4~5 mag。它具有一般空间目标的形态不规则性, 选定 Jason-1 卫星作为第 2 颗目标星。其数据处理过程和 Ajisai 卫星完全一样, 为避免重复, 仅在文中 3.3 节列出 Jason-1 卫星的数据分析结果。

2.2 定轨原理

精密定轨的基本原理就是利用含有误差的观测值和数学模型来得到卫星状态及有关参数的最佳估值 (包括卫星轨道量和有关物理、几何参数)。定轨计算一般采用基于线性估计技术的统计动力学方法, 因此, 这种方法也称为统计定轨。若观测值样本数为 n , 误差序列记为 y_{ki} , 对应的权重为 w_{ki} , 那么第 k 次迭代的中误差 (RMS) 可表示为:

$$RMS_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_{ki})(y_{ki})^2}{\sum_{i=1}^n (w_{ki})}}. \quad (1)$$

一般赤经的残差表示为 $[\alpha_i - (\alpha_c)_{ki}] \cos(\delta_i)$ 。当卫星状态最佳估值的方差小于预先指定的判据 POS_{min} , 或者 $|RMS_k - RMSP|/RMS_k$ 小于预先指定量时 ($RMSP$ 为中误差的预报值, 在数值上等于 RMS_{k+1}), 只要两个条件满足其一, 即认为程序正常收敛。

2.3 力学模型、测量模型和参考系

采用的力学模型为: (1) 地球非球形摄动 (JGM3 地球引力场模型, 取 70×70 阶); (2) 日月引力潮汐 (采用 DE405/LE405 星历表太阳和月球位置); (3) 固体潮汐摄动 (IERS1996 规范, Wahr 模型); (4) 海潮摄动 (CSR3.0 模型); (5) 太阳光压和地球辐射压摄动; (6) 类

阻力摄动; (7) 相对论摄动; (8) 地球自转形变摄动; (9) 经验的 RTN 摄动; (10) n 体摄动(太阳和月球).

测量模型为: (1) Marini-Murray 大气折射; (2) Ajisai 卫星的归心修正(1.010 m); (3) 固体潮引起的台站位移; (4) 永久潮汐项对台站的影响; (5) 海潮负荷对台站的影响; (6) 地球自转形变对台站的影响.

参考系为: (1) J2000.0 平赤道平春分点地心惯性系; (2) 测站坐标为 ITRF97; (3) 板块模型为 ITRF97; (4) IAU2000 岁差; (5) 章动模型, IERS 章动改正; (6) DE405/LE405 行星历表.

2.4 定轨结果

选择 2010 年 3 月 2 日至 10 日的全球 Ajisai 卫星激光测距数据为样本作精密定轨. 收敛标准为卫星在 3 d 轨道内的初始位置的改正小于 1 cm 或 3 d 内观测残差相对于预报残差的相对误差小于 0.01. 数据剔除标准为 3σ 标准, 定轨结果如表 1 所示, 表中第 2 列(obs) 和第 3 列(edited obs) 分别表示观测数据个数和被剔除的数据个数. 从表 1 中可以看出定轨精度(RMS) 主要在 2~3 cm 之间, 优于 3 cm, 定轨结果和同时期空间研究中心(CSR) 计算的精度相当^[6].

表 1 Ajisai 卫星激光测距定轨精度

Table 1 The RMS of orbit determination by the Ajisai SLR data

Start time(UTC)	obs	edited obs	(RMS_R)(m)	(RMS_T)(m)	(RMS_N)(m)	RMS(m)
2010 3 2 00 00 00	577	23	0.013	0.007	0.007	0.017
2010 3 3 00 00 00	649	21	0.014	0.008	0.008	0.018
2010 3 5 00 00 00	846	3	0.019	0.011	0.012	0.025
2010 3 6 00 00 00	873	28	0.022	0.012	0.012	0.027
2010 3 7 00 00 00	1014	102	0.023	0.014	0.012	0.029
2010 3 8 00 00 00	1136	160	0.019	0.012	0.011	0.026
2010 3 9 00 00 00	1064	191	0.018	0.012	0.009	0.023
2010 3 10 00 00 00	891	179	0.018	0.011	0.011	0.023

注: R、T、N 分别表示卫星轨道的径向切向和法向 3 个分量.

2.5 坐标转换

用于天文定位定标星的坐标系是以太阳系质心为中心, J2000.0 的平赤道平春点为基准的天球坐标系(ICRS)^[7]. 因此, 为得到空间目标在某一时刻的赤经赤纬理论值 α_c 和 δ_c , 首先要得到它在站心历元赤道坐标系的位置矢量 $\mathbf{R}_c(x_c, y_c, z_c)$. 激光测距精密定轨可以得到空间目标在地球质心 J2000.0 坐标系中的位置矢量 $\mathbf{X}_j(x_j, y_j, z_j)$, 测站在 J2000.0 坐标系的位置矢量为 $\mathbf{R}_{sj}(x_{sj}, y_{sj}, z_{sj})$, 则

$$\mathbf{R}_c(x_c, y_c, z_c) = \mathbf{X}_j(x_j, y_j, z_j) - \mathbf{R}_{sj}(x_{sj}, y_{sj}, z_{sj}), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha_c = \arctan(x_c/y_c) \\ \delta_c = \arctan(z_c/\sqrt{x_c^2 + y_c^2}) \end{cases}, \quad (3)$$

$\mathbf{R}_{sj}(x_{sj}, y_{sj}, z_{sj})$ 可以由测站在地固坐标系中的坐标矢量 $\mathbf{R}_{sb}(x_{sb}, y_{sb}, z_{sb})$ 经过一系列旋转获得, 具体步骤参见文献[8].

3 光电望远镜测量精度

3.1 外符精度

望远镜在 $(t_i + \tau)$ 时刻接收到的光信号是目标在 t_i 时刻发出的, 因此要对观测时间进行光行时修正, 光行差 τ 等于 $|R_o|/c$, $|R_o|$ 为卫星到测站的距离, c 为光速. 利用 2.5 节所述的理论值对观测值进行外符合标准的精度分析. 由中误差公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}{n-1}}, \quad (4)$$

可以求出赤经赤纬的中误差 σ_α 和 σ_δ , 总的中误差为 $\sigma = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\delta^2}$. 在剔除野值时采用 3σ 准则, 即对所有观测数据求中误差, 然后将残差 y_i 中大于 3σ 的观测值视为野值, 并将其剔除, 迭代后得到结果如表 2 所示.

表 2 Ajisai 卫星天文定位数据外符精度

Table 2 The external accord accuracy of the Ajisai celestial positioning data

Start time(UTC)	Elapse time(s)	obs	edited obs	σ_α''	σ_δ''	σ''
2010/ 3/ 2 11 44 19.518	70.968	271	2	1.22	1.19	1.71
2010/ 3/ 2 17 58 45.619	235.116	869	14	2.92	1.27	3.18
2010/ 3/ 2 20 2 53.447	73.005	250	12	2.40	1.93	3.07
2010/ 3/ 3 10 52 9.333	184.681	650	18	2.78	2.36	3.64
2010/ 3/ 3 12 50 22.034	41.634	151	3	1.45	1.51	2.09
2010/ 3/ 5 13 1 25.439	290.563	714	38	1.46	1.69	2.23
2010/ 3/ 5 19 19 7.777	183.009	671	41	1.92	1.28	2.31
2010/ 3/ 5 21 14 59.736	148.244	557	56	2.85	2.07	3.52
2010/ 3/ 6 12 12 14.445	215.292	432	35	1.14	2.09	2.38
2010/ 3/ 6 14 9 11.124	145.518	537	18	2.14	1.45	2.58
2010/ 3/ 6 18 26 30.910	180.847	644	34	2.22	1.23	2.54
2010/ 3/ 6 20 25 22.348	173.181	665	44	1.20	1.40	1.85
2010/ 3/ 7 11 24 3.450	67.044	232	6	2.96	1.12	3.17
2010/ 3/ 7 13 16 52.915	36.750	138	8	1.67	1.47	2.23
2010/ 3/ 7 19 34 42.346	74.409	119	6	2.12	2.31	3.13
2010/ 3/ 8 12 22 30.778	334.942	1158	130	1.59	2.74	3.16
2010/ 3/ 8 14 25 12.660	33.093	128	24	2.79	2.82	3.97
2010/ 3/ 8 18 41 35.967	49.070	99	9	2.09	2.18	3.02
2010/ 3/ 9 11 33 39.566	124.960	445	35	1.66	2.56	3.05
2010/ 3/ 9 13 28 47.278	197.670	368	42	2.30	2.22	3.20
2010/ 3/ 10 10 35 20.795	417.170	624	44	2.10	1.63	2.66
2010/ 3/ 10 12 39 2.465	321.214	1132	126	1.01	1.10	1.49

表 2 中第 1 列为各弧段起始时刻, 第 2 列为本弧段所持续的秒数 (同样适用于表 3). 从表 2 中可以看出, 赤经和赤纬的外符精度 σ_α 和 σ_δ 在 $2''$ 左右, 总的中误差 σ 在 $3''$ 左右浮动.

3.2 内符精度

内符精度用定轨后观测残差的均方根表示。单独利用长春站 40 cm 空间碎片望远镜对 Ajisai 卫星的天文定位数据, 对该星进行定轨。由于和激光测距精密定轨是同一颗卫星, 所以采用的力学模型相同。同样对 2010 年 3 月 2 日至 10 日期间的数据进行了处理, 在定轨的同时解算大气阻力和轨道径向及切向方向的经验加速度, 处理结果如表 3 所示。表中最后 1 项为最少定标星样本的百分比, 即利用 3 颗定标星定位的观测样本所占本弧段总观测样本的比率(同样适用于表 2)。从表 3 中可以看出, 赤经和赤纬的内符精度 RMS_{α} 和 RMS_{δ} 为 1~2'', 总的内符精度 (RMS) 为 2~3'', 优于 3''。

表 3 Ajisai 卫星天文定位数据内符精度

Table 3 The internal accord accuracy of the Ajisai celestial positioning data

Start time(UTC)	obs	edited obs	RMS_{α}''	RMS_{δ}''	RMS''	percent
2010/ 3/ 2 11 44 19.518	271	1	0.80	0.90	1.20	1%
2010/ 3/ 2 17 58 45.619	869	40	0.91	1.34	1.63	2%
2010/ 3/ 2 20 2 53.447	250	31	1.31	1.60	2.07	3%
2010/ 3/ 3 10 52 9.333	650	29	1.79	2.08	2.75	17%
2010/ 3/ 3 12 50 22.034	151	3	1.49	1.42	2.06	9%
2010/ 3/ 5 13 1 25.439	714	51	1.37	1.33	1.90	14%
2010/ 3/ 5 19 19 7.777	671	52	1.53	1.27	1.99	2%
2010/ 3/ 5 21 14 59.736	557	133	2.13	1.70	2.73	13%
2010/ 3/ 6 12 12 14.445	432	56	1.02	0.60	1.18	13%
2010/ 3/ 6 14 9 11.124	537	37	1.05	1.46	1.80	11%
2010/ 3/ 6 18 26 30.910	644	62	1.03	1.30	1.66	15%
2010/ 3/ 6 20 25 22.348	665	50	1.09	1.22	1.64	24%
2010/ 3/ 7 11 24 3.450	232	17	0.91	1.39	1.66	4%
2010/ 3/ 7 13 16 52.915	138	10	0.89	1.24	1.52	28%
2010/ 3/ 7 19 34 42.346	119	21	1.25	1.74	2.14	21%
2010/ 3/ 8 12 22 30.778	1158	164	2.30	1.73	2.87	14%
2010/ 3/ 8 14 25 12.660	128	24	2.67	2.39	3.59	32%
2010/ 3/ 8 18 41 35.967	99	11	1.85	2.09	2.79	22%
2010/ 3/ 9 11 33 39.566	445	47	1.66	0.72	1.80	17%
2010/ 3/ 9 13 28 47.278	368	83	1.52	1.32	2.02	20%
2010/ 3/ 10 10 35 20.795	624	75	1.22	0.81	1.46	8%
2010/ 3/ 10 12 39 2.465	1132	140	1.24	0.91	1.54	14%

3.3 天文定位的轨道精度

为了更直观地反映观测数据的测量精度, 用天文定位数据做定轨的卫星轨道和用激光测距精密定轨(作为理论真值)作比较。取实测数据所对应的世界协调时(UTC)^[9]的整分钟作节点, Ajisai 卫星的天文定位轨道和真值的偏差如图 1 所示(用“+”号表示)。图中横坐标为按 UTC 先后顺序所取样本数, 纵坐标为卫星轨道在 J2000.0 赤道坐标中的距离差值(单位: m)。

同样地, 对非球形卫星 Jason-1 在 2010 年 3 月期间共计 11 个弧段(pass)作数据处理。结果显示, 内符精度在 3'' 之内。Jason-1 卫星的激光测距定轨精度在 10~20 cm 左右, 天文定位数据的外符合精度约 3''. Jason-1 卫星的天文定位轨道和真值的偏差同样在

图 1 中显示 (用“□”号表示).

在图 1 中可以看出, 对于球形卫星 Ajisai 和非球形卫星 Jason-1, 天文定位的定轨轨道 x 、 y 、 z 坐标 3 分量及距离 ρ 和精密定轨轨道的差别在 100 m 之内.

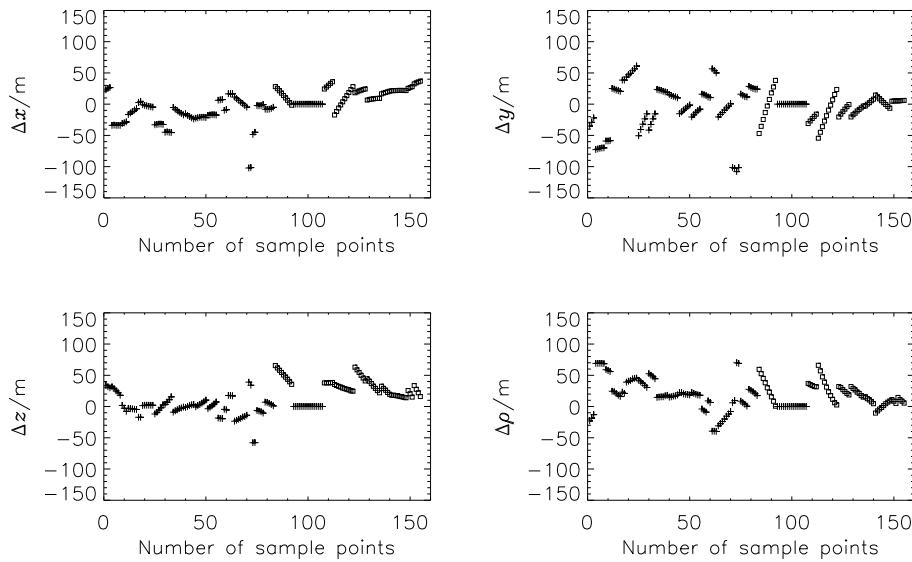


图 1 Ajisai (+) 和 Jason-1 (□) 卫星天文定位数据定轨轨道精度图.

Fig. 1 The accuracy of orbit determination by the celestial positioning data of Ajisai (+) and Jason-1 (□)

3.4 精度受定标星个数的影响

从表 2 和表 3 中可以发现, 最少定标星样本在本弧段内的比例较高时天文定位精度较差. 为了清楚地看出天文定位精度随定标星个数变化的影响, 把所有观测数按照定标星个数分类统计, 如图 2 所示. 图中横坐标为定标星个数, 纵坐标为观测量赤经赤纬的均方差 (MS_α , MS_δ), 上面两个子图对应外符合精度, 下面两个子图对应内符合精度.

从统计中看出, 随着定标星的减少, 赤经的外符合精度的均方差由 $1''^2$ 以下逐步上升到 $6''^2$, 内符合精度的均方差由 $1''^2$ 以下逐步上升到 $4''^2$; 赤纬的外符合精度的均方差由 $2''^2$ 逐步上升到 $5''^2$, 内符合精度的均方差由 $1''^2$ 以下逐步上升到 $5''^2$. 特别是当定标星数由 6 减少到 3 时, 无论是外符合精度还是内符合精度, 均方差都有显著上升.

4 结论

对于长春站 40 cm 空间碎片光电望远镜, 天文定位观测数据精度分析如下:

(1) 外符精度: 赤经中误差 σ_α 约为 $2''$, 赤纬中误差 σ_δ 约为 $2''$, 总的中误差 σ 在 $3''$ 左右.

(2) 内符精度: 赤经中误差 RMS_α 约为 $1\sim2''$, 赤纬中误差 RMS_δ 约为 $1\sim2''$, 总的中误差 RMS 约 $2\sim3''$, 优于 $3''$. 天文定位的定轨轨道 x 、 y 、 z 坐标 3 分量在观测数据覆盖范围内的精度在 100 m 之内.

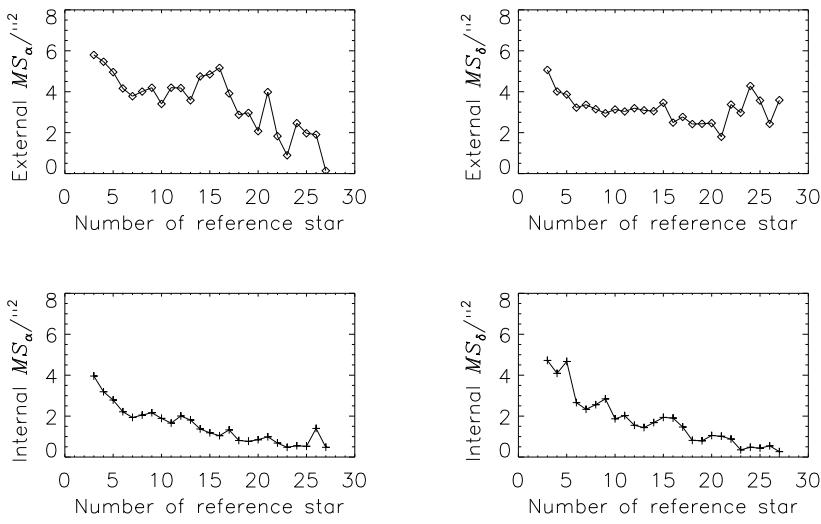


图 2 观测精度随定标星个数变化图

Fig. 2 The variation of mean square (MS) error vs the number of reference star

(3) 天文定位数据随定标星个数的减少, 定位精度下降。如果天空背景条件不好, 使最少定标星样本所占比例太大($\geq 30\%$), 则定位精度较差, 可以考虑该弧段数据不参与定轨或给予较小权重。

结果显示, 望远镜在设计精度(3'')范围内运行, 内符精度好于外符精度, 说明数据含有可以通过模型修正的系统差, 外符精度有进一步提高的空间。另外本文建设性的提出, 用最少定标星比例作为评定数据质量的一项指标, 希望对数据分析人员有所裨益。

致谢 感谢上海天文台冯初刚研究员在卫星激光测距精密定轨工作中给予的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] 李东明, 金文敬, 夏一飞, 等. 天体测量方法. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 163-165
- [2] 鲁春林, 张晓祥, 顾光德. 空间目标实时天文定位方法. 中国专利: CN1710377, 2005-12-2.
- [3] 李济生, 王家松, 刘林, 等. 航天器轨道确定. 北京: 国防工业出版社, 2003: 276-280
- [4] 刘承志, 赵有, 范存波, 等. 科学通报, 2002, 47: 406
- [5] 冯初刚, 朱元兰, 张飞鹏. 天文学报, 2003, 44: 55
- [6] 李荣旺, 李语强. 天文研究与技术, 2010, 7: 311
- [7] Arias E F, Charlot P, Feissel M, et al. A&A, 1995, 303: 604
- [8] 李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995: 28-32
- [9] 刘林, 胡松杰, 王歆. 航天动力学引论. 南京: 南京大学出版社, 2006: 3-4

Analysis on the Accuracy of Celestial Positioning Based on the SLR Precise Orbit

SUN Ming-guo¹ LIU Cheng-zhi¹ FAN Cun-bo¹ ZHAO Gang^{1,2,3}

LI Zhen-wei¹ LIANG Zhi-peng¹

(1 *Changchun Observatory Of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117*)

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

(3 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The precise orbit of the satellite Ajisai is derived from the normal point data of the satellite's laser ranging obtained from the International Laser Ranging Service (ILRS) with a RMS precision better than 3 centimeters. The accuracy of the celestial positioning data is analyzed based on the precise orbit, resulting an external accuracy of 3''. The celestial positioning data is obtained by the 40 cm optical electric telescope in Changchun observatory. The internal accuracy estimated by the orbit determination solely using the celestial positioning data is better than 3''. The accuracy of above orbit is better than 100 m in the J2000.0 coordinate within the observation pass. The data analysis on Jason-1 by the same method yields a similar result as Ajisai. The analysis on the accuracy shows that less reference stars lead to worse celestial positioning accuracy. It is proposed that the proportion of observations with least reference stars can be one of the quality criteria.

Key words space vehicles, celestial mechanics: determination of orbit, methods: data analysis