



引文格式:王波,刘路,鄢建国,等.小行星光学定轨软件研制和数据处理分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(2):277-284.DOI:10.13203/j.whugis20200195

Citation: WANG Bo, LIU Lu, YAN Jianguo, et al. Development of Asteroid Optical Determination Software and Data Processing Analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(2): 277-284. DOI: 10.13203/j.whugis20200195

小行星光学定轨软件研制和数据处理分析

王波¹ 刘路¹ 鄢建国¹ 高梧桐¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:结合中国航天局2019-04-19拟定的第1个小行星探测任务规划,针对任务目标之一的主带彗星133P/Elst-Pizarro(7968)自主研发了小行星光学定轨软件。使用1979-07-24—2019-10-28发布的133P/Elst-Pizarro地面光学观测数据进行精密定轨,与国际知名小行星光学定轨软件OrbFit进行对比分析。对比发现,解算结果残差分布一致,两软件生成的残差均方根的差值小于0.01",定轨的内符合精度相互吻合。该结果初步表明,自主研发的小行星光学定轨程序可靠。在此基础上,对133P/Elst-Pizarro开展光学数据仿真定轨分析,研究地面光学数据的定轨精度。结果表明,模拟中国云南站和智利站每月一次联测,在只考虑观测噪声影响的情况下,添加接近目前实际观测水平的高斯白噪声,使用20 a光学观测资料定轨,小行星光学定轨精度在50 km量级。同时验证,增加观测数据或降低观测噪声均可有效提高小行星光学定轨精度。

关键词:主带彗星133P/Elst-Pizarro;光学定轨;仿真分析;精度分析

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-03-17

DOI:10.13203/j.whugis20200195

文章编号:1671-8860(2023)02-0277-08

Development of Asteroid Optical Determination Software and Data Processing Analysis

WANG Bo¹ LIU Lu¹ YAN Jianguo¹ GAO Wutong¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Based on the first asteroid exploration plan announced by China Space Administration on April 19, 2019, the main belt comet 133P/Elst-Pizarro (7968) is one of the possible mission targets. We aim to report integrated orbital fits for 133P through all the available ground-based optical data. **Methods:** We developed an optical orbit determination software and compared it with the well-known OrbFit software system. The 133P/Elst-Pizarro's ground-based optical observation data from July 24, 1979 to October 28, 2019 were analyzed. In addition, we carried out a simulation orbit determination analysis aimed at 133P/Elst-Pizarro to discuss the orbit determination accuracy from ground-based optical data. **Results:** After the fitting process, the residual distribution of 133P ground-based optical data is consistent between our results and the results from OrbFit. The measurement statistical residual root mean square (RMS) is less than 0.01", and the internal coincidence accuracy of orbit determination is also consistent with each other. In our simulation experiments, we used 20-year simulation optical observation data measured once a month from Yunnan station and Chile station. The data were also added with Gaussian white noise which is close to the current actual observation level. The results of our simulation experiments reflected that the optical orbit determination accuracy of the asteroid was at 50 km level. **Conclusions:** The processing results of 133P optical data suggests the reliability of our software. Further simulation analysis

基金项目:国家自然科学基金(U1831132);湖北省自然科学基金(2018CFA087)。

第一作者:王波,硕士生,主要从事小行星光学精密定轨。wangbo@whu.edu.cn

通讯作者:鄢建国,博士,教授。jgyan@whu.edu.cn

shows that the optical orbit determination accuracy of the asteroid can be effectively improved by increasing the observation data or reducing the observation noise.

Key words: main comet 133P/Elst-Pizarro; optical orbit determination; simulation analysis; accuracy analysis

在20世纪90年代以前,科学家主要通过地面天文观测和外来陨石来研究小行星的轨道、物理性质和化学成分。随着航天和深空探测技术的发展,逐步实现了飞越、绕飞和采样返回等多种空间探测方式^[1]。如在1991年,美国发射的伽利略木星探测器在飞往木星途中对951号Gaspera小行星进行了飞越探测,向地球发送回第1批从未拍摄过的小行星近距离照片^[2]。2000-02-14, NASA的近地小行星交会探测器NEAR顺利进入距离爱神小行星35 km的绕飞轨道^[3];2005-10,日本隼鸟探测器成功对近地小行星糸川进行交会与采样,为研究早期太阳系的性质提供了重要信息^[4];欧洲的罗塞塔-菲莱探测器实现了低轨道绕彗核观测和未知彗星表面精确着陆^[5];中国嫦娥二号飞越小行星图塔蒂斯^[6],除在国际上创造千米级飞越最近距离记录外,使中国成为继美国、欧洲、日本之后第4个实现小行星探测的国家。

继嫦娥二号飞越图塔蒂斯后,中国航天局2019-04-19发布了小行星探测任务规划^[7]。根据规划,中国将对近地小行星2016HO3(469219)开展伴飞探测,采样后返回地球附近,释放返回舱,将样品送回地球。探测器再经地球、火星借力到达小行星带,对主带彗星133P/Elst-Pizarro(7968)开展伴飞探测。133P/Elst-Pizarro是一颗既显示小行星特征又显示彗星特征的活跃小行星^[8],其轨道在小行星带内;在发现其在近日点出现彗星一样的尘埃尾巴前,将它作为小行星,并命名为7968 Elst-Pizarro;1996年,它在近日点的影像清楚地露出彗尾,揭示了Elst-Pizarro的彗星性质,并发现彗核的等效半径大约为2 km^[9],亮度约为17~20星等。上述探测任务中,精确确定2016HO3和133P/Elst-Pizarro的轨道对任务的完成至关重要。

在中国嫦娥二号飞越图塔蒂斯试验任务中,中国科学院紫金山天文台于2012年利用国内外光学天文望远镜对图塔蒂斯进行观测,并用获得的300多组有效观测数据结合历史光学与雷达资料对图塔蒂斯进行轨道确定,为嫦娥二号飞越小行星提供重要的科学依据和任务保障。获得的小行星定轨内符合精度优于5 km,在只使用光学数据定轨的情况下,获得的图塔蒂斯定轨内符合

精度约为22 km,定轨结果被嫦娥二号飞越小行星试验任务正式采用^[6]。实现其对图塔蒂斯的近距离飞越探测,文献[10]对从太阳能电池板监控相机拍摄的图像和卫星姿态信息的分析表明,嫦娥二号和图塔蒂斯表面的最近距离为1.9 km。OSIRIS-REx是NASA在2016年发射的探测器,用于101955 Bennu小行星研究和采样返回任务。在探测器发射前,利用1999—2013年的478次光学观测数据和雷达数据计算目标小行星的轨道,获得的Bennu星历不确定性优于10 km^[11];在探测器接近Bennu后,再次结合探测器的观测结果改进小行星轨道,以保障后续任务的开展^[12]。

目标小行星轨道的确定是小行星探测任务链条中关键的一环。在任务中,利用光学和雷达资料获得的小行星高精度轨道保障了整个探测任务的顺利进行。但位于小行星带的133P/Elst-Pizarro,由于其体积小,星地距离远,难以进行雷达探测^[13],现阶段仅有1979—2019年的光学观测资料。为保障中国小行星探测计划的顺利开展,需要进一步研究分析这一彗星目标光学定轨的精度。

本研究的目的是利用133P/Elst-Pizarro历史地面光学观测数据,与国际知名光学定轨软件OrbFit^[14]进行对比处理分析,验证自主研制的小行星光学定轨软件的可靠性。结合中国小行星观测任务,对133P/Elst-Pizarro开展仿真定轨分析,添加不同水平的高斯白噪声,研究观测数据噪声对小行星定轨结果的影响和地面光学观测资料的定轨精度,为133P/Elst-Pizarro实际光学跟踪测量提供参考。

1 光学定轨软件设计与实现

1.1 设计思路

该软件设计目的是处理小行星地面光学观测数据,采用经典的加权最小二乘法来改进小行星轨道,使得理论观测值与实际观测值之间的残差平方和最小^[15]。图1为软件解算流程。

1.2 动力学模型和时空基准

利用地面光学观测数据可对目标小行星进行定轨。定轨软件的主要组成部分包括动力学

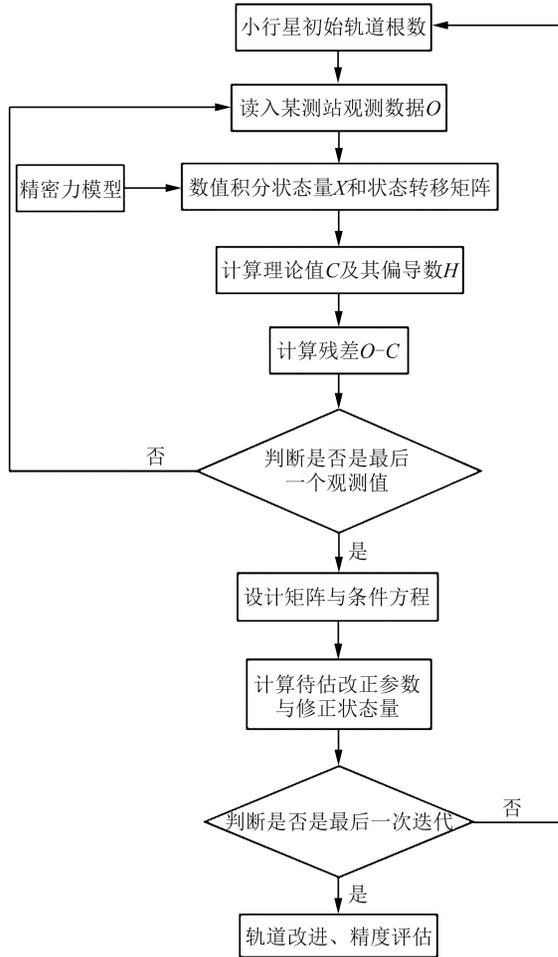


图1 小行星光学定轨解算流程

Fig.1 Process of Optical Orbit Determination for Asteroids

模型、测量模型和参数估计 3 部分。在实现动力学模型和测量模型时,涉及到不同时间系统和空

间坐标系的相互转换。因此,需要找到一个合适的时间和空间基准,在统一的时间系统下,对天体位置进行研究。定轨软件的主要解算配置和时空基准如表 1 所示。

由于地面站的站址采用国际地球参考系表示,小行星轨道状态矢量在 J2000.0 日心平黄道坐标系中,为了在同一坐标系中进行计算,需要完成从国际地球参考系到国际天球参考系、再到 J2000.0 平黄道坐标系的转换。转换过程要考虑岁差、章动、地球自转和极移修正等因素的影响。在定轨过程中,坐标系的转换、运动方程的积分计算等要考虑地面测站 UTC 时 (coordinated universal time)、行星历表 TDB 时 (barycentric dynamic time) 和岁差、章动等模型所采用的时间系统及其相互间的转换关系^[17]。极移、章动修正量和世界时与协调世界时差值 (UT1-UTC) 等参数可通过国际地球自转服务 (international earth rotation and reference systems service, IERS) 公报查取。

1.3 理论观测值计算

本文处理站心测角 (α, δ) 观测数据,即站心赤经、赤纬。小行星的运动参考系是 J2000.0 日心平黄道坐标系,运动数值积分得到的小行星状态矢量是在该坐标系下。而地面观测站的位置是在国际地球参考系下,理论观测值是站心 J2000.0 平赤道坐标系下的赤经、赤纬。因此,确定理论观测值须完成坐标系的转换。

表 1 动力学模型和时空基准

Tab.1 Dynamic Model and Space-Time Benchmark

核心模块	项目	内容	备注
动力学模型	太阳质点引力	太阳是目标小行星的环绕天体	
	N 体摄动	天体(包括八大行星、月球和冥王星)质点引力摄动	JPL DE431 历表 ^[16]
	相对论摄动	太阳质心后牛顿加速度修正	
	太阳辐射压	与小行星的密度、有效直径、反射系数等数值有关	133P/Elst-Pizarro 相关数据详见文献[9]
参数估计	状态估计方法	加权最小二乘批处理	
	估计参数	定轨历元时刻位置、速度矢量	
时空基准	坐标时	TDB	
	参考坐标系	J2000.0 日心平黄道坐标系	小行星运动参考系
其他	地球自转模型	IAU1976/1980 岁差章动模型	修正参数取自 IERS 公报

如图 2 矢量几何所示,假定坐标平面是 J2000.0 平黄道面, r 是小行星日心位置, R_\odot 是太阳的地心位置,则小行星地心位置矢量 $R_{ge} = r + R_\odot$ 。 ρ 是观测站地心位置,则可确定小行星站心位置矢量 R 为:

$$R = -\rho + R_{ge} = -\rho + r + R_\odot \quad (1)$$

式中使用的位置矢量均在 J2000.0 平黄道坐标系中进行一定坐标系转换才能得到。如 R_\odot 是太阳的地心位置,利用 DE431 星历确定的太阳位置 R_\odot^* 是在赤道坐标系,则 $R_\odot = R_x(-\epsilon)R_\odot^*$, ϵ 是

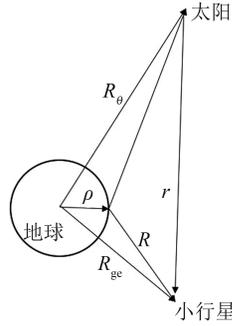


图2 光学观测量几何示意图

Fig.2 Geometrical Diagram of Optical Measurement

J2000.0平黄赤交角。同时由式(1)得到的小行星站心位置矢量 R 在黄道坐标系,亦须转到赤道坐标系来计算赤经、赤纬, $R^* = R_x(-\epsilon)R$ 。此外还需考虑光行差校正:

$$dt = \frac{R^*}{c} \quad (2)$$

式中, c 是光速299 792 458.0 m/s; dt 是信号传播时间。利用式(2)结果可计算小行星实际位置:

$$R^* = R^* - dt \times v \quad (3)$$

式中, v 是小行星日心速度。由式(3)得到的小行星J2000.0站心平赤道坐标矢量 R^* 计算理论观测值赤经 α 、赤纬 δ 表达式如下:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{R_y^*}{R_x^*}\right) \\ \delta = \arcsin\left(\frac{R_z^*}{|R^*|}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, R_x^* 、 R_y^* 和 R_z^* 是 R^* 的X、Y、Z的三轴分量。

2 实测数据处理分析

本文实测数据处理使用的是1979-07-24—2019-10-28发布的133P/Elst-Pizarro地面光学观测数据,历时40 a总共849组赤经、赤纬数据。该数据来源于多个观测站,包括G96-Mt. Lemmon Survey、691-Steward Observatory等。对这些实测数据的定轨解算,考虑的主要摄动力和其他解算配置详见表1。初始轨道来源于AstDyS-2网站上的133P/Elst-Pizarro的轨道根数,解算参数为小行星定轨历元时刻的位置速度矢量。

利用上述实测光学资料重新解算133P/Elst-Pizarro于2012-05-05(JD 2456053)的位置速度矢量,结果如表2所示。

由表2可以看出,解算后的小行星速度矢量几乎没有变化,位置与初轨偏差35.5 km,定轨解算均方根(root mean square, RMS)约为71.3 km。

与文献[6]中的20 km的图塔蒂斯光学定轨精度相比较,133P/Elst-Pizarro定轨精度要低,原因是133P历史地面光学观测资料较少,而图塔蒂斯的定轨除历史观测资料外,还在2012年间组织联合观测获得了大量光学观测数据。本文还利用定轨结果计算测量数据残差,统计残差RMS值以评估内符合定轨精度。定轨后赤经残差RMS值约为0.713 9",赤纬残差RMS值约为0.525 1"。

表2 自主软件参数解算结果

Tab.2 Results of Parameters Solution Using Independent Software

参数	数值	与初轨偏差	RMS(1 σ)
X/km	-291 090 530.559	13.986	43.489
Y/km	-317 565 597.602	-22.477	39.189
Z/km	9 623 769.361	23.739	40.723
$V_x/(m \cdot s^{-1})$	15 055.7	3.631×10^{-3}	0.001 1
$V_y/(m \cdot s^{-1})$	-10 424.3	7.346×10^{-3}	0.001 4
$V_z/(m \cdot s^{-1})$	113.6	4.543×10^{-4}	0.001 7

除了定轨解算的RMS值和测量数据残差RMS,还可以通过外符合检验的方式评估定轨精度。使用相同光学观测数据和初始轨道,用国际上知名的小行星光学定轨软件OrbFit来重新定轨,具体计算结果见表3。

表3 OrbFit参数解算结果

Tab.3 Results of Parameters Solution Using OrbFit

参数	数值	与初轨偏差	RMS(1 σ)
X/km	-291 090 532.667	16.093	44.477
Y/km	-317 565 610.549	-9.530	39.289
Z/km	9 623 794.171	-1.071	39.574
$V_x/(m \cdot s^{-1})$	15 055.7	3.881×10^{-3}	0.001 1
$V_y/(m \cdot s^{-1})$	-10 424.3	6.951×10^{-3}	0.001 5
$V_z/(m \cdot s^{-1})$	113.6	2.290×10^{-4}	0.001 6

由表3可以看出,利用OrbFit软件解算得到的初轨位置改进量约为18.7 km,位置解算RMS值约为71.1 km。从表2和表3两种不同软件解算的结果可以发现,因两者处理的光学观测数据及其权重的设置相同,初轨解算的RMS值接近,三轴RMS差值均小于2 km。同时,因为两个软件采用的积分器和力模型实现细节上的差异,相互间解算位置偏差大约为28 km,该偏差在初轨解算误差范围之内。

计算OrbFit软件定轨后赤经残差RMS值约为0.715 4",赤纬残差RMS值约为0.526 4",由此可知,两软件计算残差RMS相互间差值小

于 0.01"。

图 3 给出了赤经、赤纬残差互差图,由图 3 分

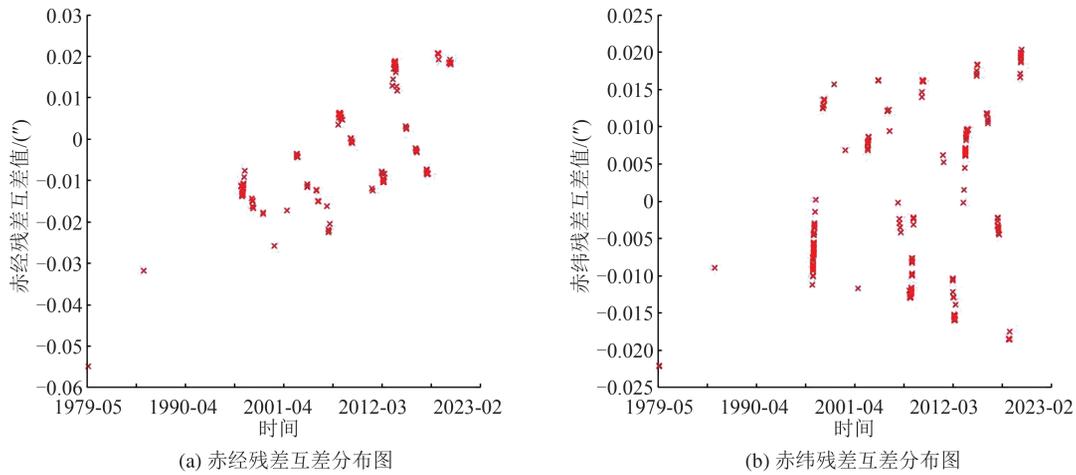


图 3 赤经、赤纬残差互差分布图

Fig.3 Difference of the Residuals of Right Ascension and Declination

图 4 为两软件定轨后外推星历之间的偏差。从图 4 可见,外推星历的偏差在 30 km 内,而定轨解算精度在 70 km 量级。

综上所述,利用历史光学观测数据对 133P/Elst-Pizarro 进行定轨,残差水平和解算精度与 OrbFit 软件系统处理结果一致,外推星历互差值在也在精度范围内。这些结果初步验证了自主研制的小行星光学定轨软件的可靠性。

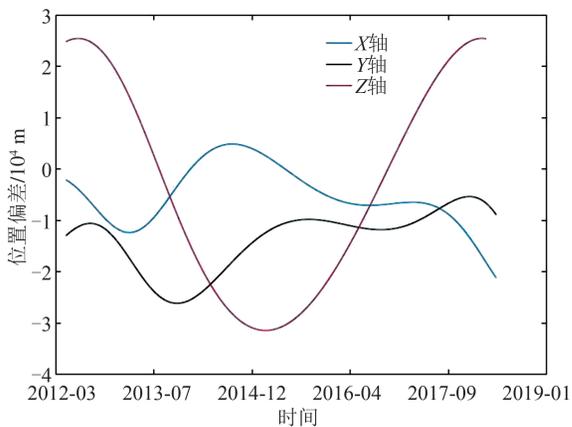


图 4 外推星历互差图

Fig.4 Difference of Extrapolated Ephemeris

3 仿真分析

仿真试验一方面可以验证定轨软件的功能和自恰性,另一方面也可以检验定轨策略实施的可行性^[19]。考虑到中国小行星探测器抵达 133P/Elst-Pizarro 之前,有多年时间可以开展光学观测,有望进一步改进轨道精度。针对中国拟进行

析可得,逐点残差数值差异均小于 0.05",优于光学观测平均误差^[18]。

的小行星探测任务,对 133P/Elst-Pizarro 开展初步的仿真定轨试验分析。仿真过程中,标称轨道在太阳质点引力加速度、所有大行星质点引力摄动、太阳的相对论摄动和太阳辐射压等力模型下产生,通过标称轨道和相应观测模型,可仿真出赤经、赤纬观测值。由实测数据分析可知,观测站一夜得到的光学观测数据约为 4 组,为了在 24 h 内尽可能多地获取仿真数据,观测站考虑位于中国的云南天文台和位于智利阿塔卡玛区域的南美观测站,二者相差 12 个时区,联测可在 24 h 内得到更多的观测数据。

仿真分析试验目的是探究不同噪声水平影响下的光学模拟观测值的定轨精度。选取中国云南和智利两天文台作为模拟观测站生成仿真观测值,观测弧段与前文实测数据集中部分弧段时长类似,历时 20 a。表 4 给出了利用 OrbFit 软件外推 133P/Elst-Pizarro 轨道获得的初始轨道信息,开普勒轨道 6 根数(半长轴 a , 轨道倾角 i , 偏心率 e , 升交点赤经 Ω , 近地点角距 ω , 平近点角 M)的函数,可根据文献[20]转换为需要的笛卡尔坐标,AU 是长度单位,约等于地球跟太阳的平均距离。假设两天文台每月观测一次,每次共观测 10 组数据,在同一天的不同时刻进行模拟观测生成仿真观测值,分别加上不同精度水平的高斯白噪声进行仿真试验。

表 5 对 4 种方案进行了对比,研究不同情况下的光学观测资料对定轨精度的影响。方案 1 为对比实验,处理在零噪声添加下的定轨情况;方案 2 设置了与前文实测数据处理结果残差 RMS

表4 初始轨道

Tab.4 Equinoctial Orbital Elements

参数	数值
时间	2021-01-01
半长轴/AU	3.164 263 621 791 612 0
$e \times \sin(\omega + \Omega)$	-0.145 737 655 500 451
$e \times \cos(\omega + \Omega)$	0.058 571 578 867 105
$\tan(i/2) \times \sin \Omega$	0.004 122 980 432 246
$\tan(i/2) \times \cos \Omega$	-0.011 400 256 739 563
平均经度/(°)	77.633 785 095 603 7

相同数值的白噪声;方案3认为赤经、赤纬光学观测测量具有相同的精度,并认为光学观测的平均误差为 $0.37''$ ^[21],并以此设置白噪声;方案4降低噪

声水平一个量级进行实验。方案2和方案3添加的均为接近实际观测水平的白噪声,各方案中均有中国云南站与智利站联测数据和云南单站数据定轨结果对比。由于是仿真试验,软件生成的标称轨道为已知,这里定轨的精度评价也可以通过重建轨道与标称轨道的差异给出^[22]。初轨可能存在误差,定轨过程中在所有方案中初轨位置速度的X、Y、Z 3方向上分别加上 -10.0 km 、 10.0 km 、 -10.0 km 和 -10.0 m/s 、 10.0 m/s 、 -10.0 m/s 的偏差进行试验^[23]。在定轨过程中,将初轨位置3方向误差分别增加到 100 km 仍然可以收敛,不影响仿真试验结论。

表5 不同情况标称轨道与重建轨道差值

Tab.5 Difference Value Between Nominal Orbit and Reconstructed Orbit in Different Cases

方案	白噪声	数据	dX/m	dY/m	dZ/m	偏差值/m	RMS(1σ)/m
1	无	联测	-0.05	0.24	-0.01	0.24	
		云南站	-0.04	0.24	-0.01	0.24	
2	赤经 $0.71''$	联测	-30 519.91	18 815.50	15 651.02	39 120.86	81 714.93
	赤纬 $0.53''$	云南站	34 435.95	18 911.55	10 867.80	40 762.61	129 212.05
3	赤经 $0.37''$	联测	-18 289.31	10 679.24	9 769.22	23 323.44	46 610.53
	赤纬 $0.37''$	云南站	19 144.14	10 929.88	8 315.42	23 560.70	73 702.88
4	赤经 $0.03''$	联测	-1 486.84	868.06	792.09	1 895.16	3 779.23
	赤纬 $0.03''$	云南站	1 548.28	888.39	674.21	1 908.14	5 975.91

从表5的数据信息可以看出,方案1用零噪声仿真观测值进行精密定轨,联测和云南单站定轨结果都能将设定的初始轨道偏差全部改正,重建轨道与标称轨道间最大偏差小于 0.3 m ,说明定轨程序有很好的内恰性。方案2和方案3添加的均为接近实际观测水平的白噪声,联测解算的偏差值分别为 39.1 km 与 23.3 km ,而云南单站数据处理结果分别为 40.8 km 与 23.6 km ,这是高斯白噪声对定轨的影响。可以看到,接近实际的观测噪声使重建轨道偏离标称轨道,20 a仿真数据对定轨结果的影响在 50 km 级别,噪声越大,解算位置偏差越大。

结合各方案中联测与云南单站结果数据偏差值和RMS分析可知,在20 a时间跨度下,联测和单站观测方式对偏差值影响较小,更多的是对解算精度的影响,联测可以获得更高精度的解算结果。联测获得的更多观测数据可以降低噪声对定轨解算结果的影响,使重建轨道更接近标称轨道。在方案4中,降低噪声水平一个量级,无论是联测还是单站数据,解算位置偏差显著降低到 2 km 内。但现有光学观测精度达不到 $0.03''$ 这个

标准,近些年更多实测光学数据的精度信息中噪声水平约为 $0.3''$ 。在定轨过程中,设置观测数据权重与白噪声一致,由偏差值和RMS两列可以看出,定轨结果与标称轨道的偏差均收敛到了定轨内符合精度范围内,说明所得位置偏差在该方案观测资料精度下是合理的。

此外,小行星光学定轨精度影响因素除观测资料本身外,还有一个影响因素是时间。增加数据获取时间长度,即增加观测弧的长度,也可以提高定轨精度,如在方案2联测基础上,延长数据获取时间,从20 a增加到25 a,重建轨道与标称轨道间位置偏差降低到 25 km ,定轨内符合精度也提高到 75 km 。但定轨精度的高低更多地取决于观测资料精度情况,因为继续增加数据获取时间长度,并不能如方案4一样达到 10 km 内的定轨精度。当然,再延长更多的观测时间可以达到较好的定轨精度,但花费的时间成本太高且效率较低,故提高光学定轨精度的有效途径是升级观测设备,提高观测精度。

图5是方案2联测定轨后赤经、赤纬残差分布图,由图5可知,残差分布均匀,赤经、赤纬残差

RMS 值与设置的白噪声水平一致,其余各方案解算得到的残差与之类似,均和给定的测量噪声水

平吻合,结合上文的分析,说明仿真定轨解算结果可靠。

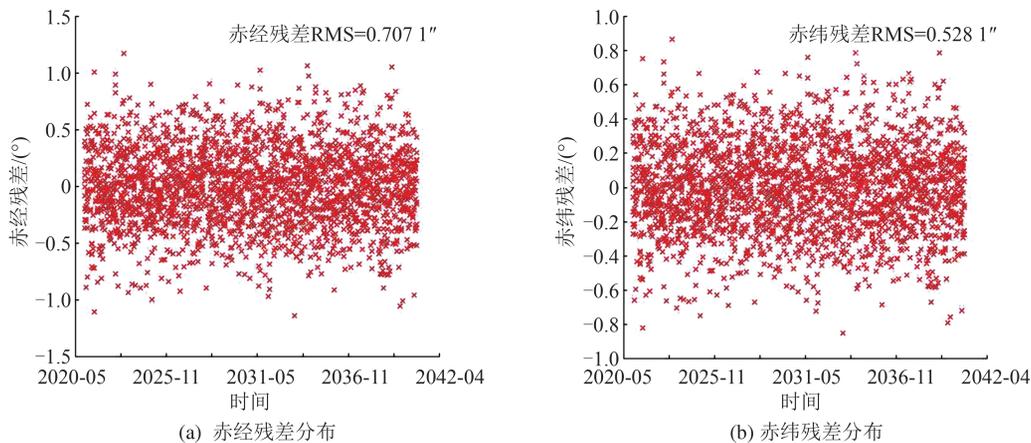


图5 方案2联测定轨残差分布

Fig.5 Residual of Scheme 2 Joint Measurement

4 结 语

在深空探测任务中,轨道测量与确定是整个任务导航的关键,直接关系任务的成败。针对中国拟定的小行星探测计划的具体任务,自主研制了小行星光学定轨软件,使用 133P/Elst-Pizarro 的实测数据与 OrbFit 软件系统进行对比处理分析。结果表明,两者解算的观测量残差分布一致,统计残差 RMS 相互间差值小于 $0.01''$,定轨的内符合精度相互吻合。验证了自主研制的小行星光学定轨软件的可靠性。在 133P/Elst-Pizarro 的仿真定轨分析试验中,只考虑观测噪声影响的情况下,添加接近实际观测水平 $0.70''$ 的高斯白噪声,使用 20 a 光学观测资料定轨,小行星光学定轨精度在 50 km 级别。更多仿真试验表明,增加观测数据或降低观测噪声均可有效提高小行星光学定轨精度。

对于中国小行星探测任务,现有光学观测资料的定轨精度还不足以支持任务的开展,需要在任务开始前或者任务期间对 133P/Elst-Pizarro 进行联合观测得到更多高精度观测资料,以获得满足任务需求的小行星高精度星历。

在后续工作中将细化动力学模型,考虑 133P/Elst-Pizarro 受到的 Yarkovsky 效应^[24]和自身在运行至近日点附近的彗核喷发作用引起的轨道摄动。同时进一步研究光学观测资料的应用,特别是利用光学数据确定外行星卫星的星历^[25-27],再根据行星卫星的运动特征反演行星系统的属性等^[28]。本文对 133P/Elst-Pizarro 的光学

定轨实测数据处理和仿真分析,可以为中国小行星探测任务中的导航定轨提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] Zhang Rongqiao, Huang Jiangchuan, He Rongwei, et al. The Development Overview of Asteroid Exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 417-423. (张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 417-423.)
- [2] Veverka J, Belton M, Klaasen K, et al. Galileo's Encounter with 951 Gaspra: Overview [J]. *Icarus*, 1994, 107(1): 2-17.
- [3] Prockter L, Murchie S, Cheng A, et al. The NEAR Shoemaker Mission to Asteroid 433 Eros [J]. *Acta Astronautica*, 2002, 51(1): 491-500.
- [4] NASA. Solar System Exploration: Hayabusa [EB/OL]. [2020-01-12]. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/hayabusa/in-depth/>.
- [5] Boehnhardt H, Bibring J P, Apathy I, et al. The Philae Lander Mission and Science Overview [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2097): 20160248.
- [6] Hu Shoucun, Ji Jianghui, Zhao Yuhui, et al. Determination and Precision Analysis of Tutatis Orbit in Chang'E-2 Flying over Asteroid Test [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2013, 43(5): 506-511. (胡寿村, 季江徽, 赵玉晖, 等. 嫦娥二号飞越小行星试验中图塔蒂斯轨道确定与精度分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 506-511.)
- [7] China National Space Administration. A Project Op-

- portunity Announcement of Asteroid Exploration Mission Payload and Piggyback [EB/OL]. [2020-01-12]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/content.html>. (中国国家航天局. 小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告 [EB/OL]. [2020-01-12]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/content.html>.)
- [8] Li Chunlai, Liu Jianjun, Yan Wei, et al. Overview of Scientific Objectives for Minor Planets Exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 424-436. (李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 424-436.)
- [9] Yu L L, Hsia C H, Ip W H. Low-Activity Main-Belt Comet 133P/Elst-Pizarro: New Constraints on Its Albedo, Temperature, and Active Mechanism from a Thermophysical Perspective [J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(2): 66.
- [10] Cao J, Liu Y, Hu S, et al. Navigation of Chang'E-2 Asteroid Exploration Mission and the Minimum Distance Estimation During Its Fly-By of Toutatis [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 491-500.
- [11] Chesley S R, Farnocchia D. Asteroid 101955 (1999 RQ36) Epemeris Delivery, JPL Solution 76 [R]. Pasadena, USA: Jet Propulsion Laboratory, 2013.
- [12] Farnocchia D, Takahashi Y, Chesley S R, et al. Asteroid 101955 Bennu Epemeris D-Eelivery, JPL Solution 103 [R]. Pasadena, USA: Jet Propulsion Laboratory, 2018.
- [13] Zhang Xiang, Ji Jianghui. Ground-Based Radar Detection of Near-Earth Asteroids [J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(1): 24-39. (张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状[J]. 天文学进展, 2014, 32(1): 24-39.)
- [14] The OrbFit Software Package [DB/OL]. [2020-01-13]. <http://adams.dm.unipi.it/~orbmain/orbfit/>.
- [15] Li Jisheng. Satellite Precision Orbit Determination [M]. Beijing, China: Chinese People's Liberation Army Publishing House, 1995. (李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.)
- [16] JPL DE431 Ephemeris [DB/OL]. [2020-01-13]. <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ascii/>.
- [17] Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits Models, Methods and Applications [M]. Wang Jiasong, Zhu Kaijian, Hu Xiaogong, Translated. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2012. (Montenbruck O, Gill E. 卫星轨道-模型、方法和应用[M]. 王家松, 祝开建, 胡小工, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.)
- [18] Carpino M, Milani A, Chesley S R. Error Statistics of Asteroid Optical Astrometric Observations [J]. *Icarus*, 2003, 166(2): 248-270.
- [19] Hu Songjie, Tang Geshi. BACC Orbit Determination and Analysis Software for Deep-Space Explorers [J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2010, 29(5): 69-74. (胡松杰, 唐歌实. 北京中心深空探测器精密定轨与分析软件系统[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(5): 69-74.)
- [20] Broucke R A, Cefola P J. On the Equinoctial Orbit Elements [J]. *Celestial Mechanics*, 1972, 5(3): 303-310.
- [21] Vinogradova T A, Kochetova O M, Chernetenko Y A, et al. The Orbit of Asteroid (99942) Apophis as Determined from Optical and Radar Observations [J]. *Solar System Research*, 2008, 42(4): 271-280.
- [22] Yang Xuan, Yan Jianguo, Ye Mao, et al. Preliminary Numerical Analysis of Precise Orbit Determination for a Multi-way Microwave Measurement Mode in the Lunar and Mars Missions [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(2): 154-161. (杨轩, 鄢建国, 叶茂, 等. 对一种月球与火星探测多程微波测量链路定轨定位的数值模拟初步分析[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 154-161.)
- [23] Liu Shanhong, Yan Jianguo, Yang Xuan, et al. Development of Mercury Precise Orbit Determination Software and Application [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 510-517. (刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 水星探测器精密定轨软件研制及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(4): 510-517.)
- [24] Greenberg A H, Margot J L, Verma A K, et al. Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids [J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(3): 92.
- [25] Emelyanov N. Precision of the Ephemerides of Outer Planetary Satellites [J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(3): 411-420.
- [26] Emelyanov N V, Samorodov M Y. Analytical Theory of Motion and New Ephemeris of Triton from Observations [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 454(2): 2205-2215.
- [27] Brozović M, Showalter M R, Jacobson R A, et al. Orbits and Resonances of the Regular Moons of Neptune [J]. *Icarus*, 2020, 338: 113462.
- [28] Jacobson R A. The Orbits of the Neptunian Satellites and the Orientation of the Pole of Neptune [J]. *The Astronomical Journal*, 2009, 137(5): 4322-4329.