

激光与光电子学进展

宽视场型光电望远镜的空间目标定轨精度分析

陈龙^{1,2}, 刘承志^{1*}, 李振伟¹, 康喆¹, 丁一高^{1,2}, 邓诗宇^{1,2}

¹中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于某光电望远镜阵列研究分析了宽视场型光电望远镜的精确定轨(POD)和轨道预报(OP)精度。利用国际激光测距服务提供的卫星激光测距数据对激光星 Jason-3、Cryosat-2 进行精确定轨, 并将其作为参考轨道, 分析了宽视场型光电望远镜观测数据对 Jason-3、Cryosat-2 的 POD 和 OP 精度。计算结果表明, 宽视场型望远镜观测数据的 POD 均方根(RMS)位置误差优于 250 m, 速度误差的 RMS 小于 0.25 m/s。基于 POD 结果的 3 天轨道预报精度优于 20", 这表明宽视场型光电望远镜在提高观测效率的同时, 能通过事后对观测数据的处理获得空间目标较高精度的轨道信息, 为有轨道信息需求的工作和空间任务提供数据支持。

关键词 探测器; 精确定轨; 轨道预报; 光电望远镜阵列; 空间目标

中图分类号 P228

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0304001

Accuracy Analysis of Orbit Determination of Space Objects for Wide Field-of-View Photoelectric Telescope

Chen Long^{1,2}, Liu Chengzhi^{1*}, Li Zhenwei¹, Kang Zhe¹, Ding Yigao^{1,2}, Deng Shiyu^{1,2}

¹Changchun Observatory of National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130117, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on electro-optical sensor array, the accuracy of space objects precise orbit determination (POD) and orbit prediction (OP) are studied in this paper for the wide field-of-view photoelectric telescopes. The reference orbit of Jason-3 and Cryosat-2 obtained by using satellite laser ranging data from the International Laser Ranging Service, which are used to analyze the POD and OP accuracy of the wide field-of-view photoelectric telescope observations. The calculation results show that the POD root mean square (RMS) position error of the wide field-of-view photoelectric telescope observation data is better than 250 m and the RMS of the velocity error is less than 0.25 m/s. The accuracy of the 3-day orbit prediction based on the POD results is better than 20". The results indicate that the wide field-of-view photoelectric telescope can not only improve observation efficiency, but also obtain accurate orbit information of space objects through post-processing of its observations, which can provide data support for related work and space missions with orbit information.

Key words detectors; precise orbit determination; orbit prediction; photoelectric telescope array; space objects

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-26; 录用日期: 2021-05-13

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2031129)、中国科学院天文大科学研究中心前瞻课题(Y9290201)

通信作者: *lcz@cho.ac.cn

1 引言

欧洲空间局(ESA)估计地球轨道上尺寸大于 10 cm 的空间目标约 34000 个,尺寸为 1~10 cm 的空间目标超过 90 万个^[1]。要编目如此庞大数量的空间碎片,完成对空间目标的定轨、预报,进而分析评估空间风险并进行有效的空间目标碰撞预警需要大量的观测数据。

地基光学望远镜具有观测区域广、探测距离远、运行成本低等优点,被广泛应用于空间目标观测工作中。目前,利用光学望远镜对空间目标观测的模式主要有两种,一种是通过窄视场望远镜对单个空间目标进行主动跟踪观测,这种传统观测方式的优点是观测精度高且能对空间目标进行全过境弧段跟踪观测,获取足够弧长的观测数据用于轨道确定等工作,缺点是跟踪观测依赖空间目标的先验信息进行轨道预报(OP),观测效率较低,难以广泛应用于新空间目标编目的工作中。随着光电望远镜等相关技术的发展,另一种利用宽视场望远镜对指定天区进行监视观测的巡天观测模式得到了广泛应用,这种观测模式是被动接收通过对应天区的空间目标光学信息。虽然该模式观测数据的精度和弧长低于传统观测模式,在数据处理前也不知道数据弧段对应的空间目标“身份”信息,但能同时观测多个空间目标,大幅度提高了观测效率;且该模式不需要空间目标的先验信息,有助于新目标的发现与编目。

针对宽视场型望远镜获得的观测数据没有对应空间目标“身份”信息的问题,丁一高等^[2]提出了一种利用两行轨道根数(TLE)数据对未知空间目标观测数据进行匹配识别的方法,对某光电望远镜阵列的观测数据平均匹配率约为 85%。Lei 等^[3]对某光电望远镜阵列在 2017 年 8 月 4 日至 2017 年 9 月 30 日未匹配的数据弧段进行空间目标编目处理,结果表明,该光电望远镜阵列在上述时间段内探测到的未编目目标达到 415 个,但关于该宽视场型望远镜数据精密定轨(POD)以及轨道预报精度的报道较少。杜建丽等^[4]利用仿真数据分析类似弧长数据的定轨预报性能,但仿真数据误差为 1",不符合观测数据的实际精度。精密定轨的结果决定着轨道预报的精度,轨道预报在激光测距、轨道机动等技术中扮演着不可或缺的角色,有学者认为实现上述技术的轨道预报精度应该达到 20"^[5]。

本文基于某光电望远镜阵列研究分析了宽视场型光电望远镜的空间目标精密定轨和轨道预报精度,因望远镜阵列观测到的绝大部分空间目标为空间碎片或非合作目标,难以确定其真实轨道。没有高精度的参考轨道,就难以准确分析观测数据的定轨及预报精度,是相关研究面临的难题之一。针对该问题,将观测数据与 TLE 进行关联匹配,从匹配结果中选取激光星作为研究对象,利用连续三天间隔 24 h 的多弧段数据进行精密定轨后,分析望远镜阵列的精密定轨和轨道预报精度,参考轨道通过对国际激光测距服务提供的卫星激光测距(SLR)数据进行精密定轨。

2 望远镜及观测数据简介

某光电望远镜阵列由 8 个按照一定阵列结构排列的子望远镜(口径为 15 cm,焦距为 15 cm)组成,如图 1 所示。每个子望远镜配备了一台尺寸为 3200 pixel×1800 pixel,视场角为 14°×14°的 CCD 相机以及图像处理计算机。通过图像采集与处理系统控制望远镜和计算机进行图像采集和处理工作,同时通过 GPS 时钟提供精准的时间。整个光电阵列能对仰角范围为 18°~32°,方位角范围为 -63°~66°的北方天区形成有效覆盖,监视天区可达到 1600 平方度^[6]。该望远镜阵列在 19 等背景天光条件下探测的极限星等为 10.5 等,主要观测对象为低地球轨道(LEO)空间目标,观测精度约为 9"。采用的观测模式及视场大小决定了观测数据的特点,如观测数据量大但弧长较短,大量观测数据的弧长在 40 s 左右^[7]。由于事先不知道观测数据对应的空间目标“身份”信息,无法直接将其应用于轨道确定等应用,且需要事后对观测数据进行匹配识别处理。



图 1 光电望远镜阵列的实物图

Fig. 1 Physical image of the photoelectric telescope array

3 数据处理方法

3.1 数据匹配

美国战略司令部负责维护的全球最大空间目标编目库包含约 23000 个已编目目标,这些目标对应的 TLE 文件可从 <https://www.space-track.org/> 网站下载。通过一种全交叉的匹配识别算法可以将光电望远镜阵的观测数据与编目库中 TLE 进行关联。关联方法是利用 SGP4 模型对 TLE 进行轨道预报,得到观测弧段历元时刻 TLE 对应的估计值,再与观测数据做差,如果差值小于预先设定的阈值则认为该观测弧段和 TLE 对应同一空间目标。将未匹配的观测弧段认定为未编目的空间目标,经过初轨关联、轨道确定等一系列处理后可编目进入空间目标编目库^[2]。

3.2 精密定轨与轨道预报

精密定轨也被称为统计定轨,是指利用统计学方法对初始轨道根数进行改进,得到符合统计学结果的最优轨道。根据统计学方法又可以分为最小二乘法和卡尔曼滤波法两大类,最小二乘法主要应用于对观测数据的事后处理,卡尔曼滤波法主要应用于实时数据处理的轨道确定,实验采用的是最小二乘法。精密定轨方法可简单概述为将空间目标的初始状态看作变量,利用精密的动力学模型结合空间目标的状态方程对空间目标的初始状态进行传播,得到观测弧段历元时刻空间目标对应的估计值,再与观测值做差后将差值的最小平方和作为最优轨道的判断条件,从而得到一个包含 n 个未知量的 n 个非线性代数方程组,只能通过迭代法求解。预设收敛判据并将初始轨道作为初值代入该方程组,达到收敛条件时跳出迭代,得到空间目标的精密轨道。收敛判据:1)空间目标位置矢量最新估值的方差小于预设的判据 P_{\min} ;2)观测残差的均方根(RMS)满足 $|R_{MS} - R_{MSP}| / R_{MS} < \epsilon$ 。其中, R_{MS} 为观测残差的均方根, R_{MSP} 为观测残差均方根的线性预估值。当满足上述任一条件时即可跳出迭代,得到空间目标的精密轨道^[8]。

获得空间目标的精密轨道后可进行轨道预报,轨道预报方法分为解析法、半解析法和数值积分三种方法。考虑到实验研究对象为 LEO 空间目标,轨道预报时间较长,对预报精度要求较高且没有实时跟踪测量的需求,用数值积分法进行轨道预报。数值积分法在已知空间目标初始时刻状态下配合精密的动力学模型和高精度数值积分器(如 11 阶 Cowell 积分器)对 LEO 空间目标 7 天的预报精度在 100 m 以内。精密定轨和轨道预报过程采用的动力学模型如表 1 所示

表 1 动力学模型
Table 1 Dynamic model

Dynamic model	Description
Earth gravity	JGM3, 70×70
N-body perturbation	DE405 Ephemeris
Atmospheric drag	MSIS86
Solid earth tides perturbation	IERS2010
Ocean tides perturbation	CSR3.0
Relativistic perturbation	IERS2010
Solar radiation pressure	Box-wing

4 分析与讨论

利用 3.1 节中的数据匹配方法,对某光电望远镜阵列 2017 年 9 月 1 日至 2017 年 9 月 3 日的观测数据进行处理,得到 3 天的观测数据与 TLE 的匹配率分别为 86.33%、83.48%、83.54%。用激光星、连续三天每天至少 1 个弧段的观测数据作为筛选条件,在匹配结果中找到 Jason-3、Cryosat-2 两颗卫星作为研究对象,对宽视场型光电望远镜的空间目标定轨预报性能进行初步分析。

在上述时间段内,某光电望远镜阵共获取 Jason-3 卫星 14 个弧段的观测数据,观测最短弧长为 12.8 s,最长弧长为 135.9 s,平均弧长为 78.6 s。获得 Cryosat-2 卫星 9 个弧段的观测数据,观测最短弧长为 12.7 s,最长弧长为 85.2 s,平均弧长为 30.7 s。利用 3.2 节中的动力学模型对上述弧段进行精密定轨后,轨道误差的标准差如表 2 所示。其中,轨道误

表 2 精密定轨的 RMS

Table 2 RMS of the precise orbit determination

Space object	Position error /m				Velocity error / (m·s ⁻¹)			
	x	y	z	3D	v_x	v_y	v_z	V_{3D}
Jason-3	126.33	124.63	147.68	230.87	0.12	0.12	0.11	0.20
Cryosat-2	93.84	95.49	95.15	164.25	0.08	0.09	0.10	0.15

差用三维位置和速度体现。利用数值积分法对获得的 Jason-3、Cryosat-2 精密轨道进行轨道预报,使用的动力学模型和精密定轨相同,积分器选择 11 阶 Cowell 积分器,3 天的轨道预报误差如图 2 所示。该误差以望远镜指向误差的形式体现,预报步长为 1 min。需要说明的是,上述误差中的参考轨道均通过对全球激光测距服务系统提供的 SLR 数据进行精密定轨获取,对 Jason-3、Cryosat-2 卫星定轨的精度分别为 1.95 m 和 1.15 m。上述精密定轨及轨道预报计算过程中 Jason-3、Cryosat-2 卫星的弹道系数分别取 $0.01103704694262 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、 $0.00131358595726 \text{ m}^2/\text{kg}$,由长期的 TLE 数据估计

得到^[9]。从表 2 可以发现,宽视场型望远镜对 Jason-3 和 Cryosat-2 卫星进行精密定轨的三维位置、速度误差分别为 230.87 m、0.20 m/s 和 164.25 m、0.15 m/s,且各个方向上的误差分布均匀。值得注意的是,在观测时间段内,Cryosat-2 卫星的观测弧段比 Jason-3 卫星少 5 段,观测数据的总弧长短 824 s,但 Cryosat-2 卫星精密定轨的精度却高于 Jason-3 卫星,这表明观测弧段的数量和弧长不是决定精密定轨精度的唯一条件。从图 2 可以发现,利用上述精密定轨结果进行轨道预报,预报三天的精度优于 $20''$,满足激光测距、轨道机动等技术对轨道预报信息的精度要求,为上述工作及空间任务提供了数据支持。

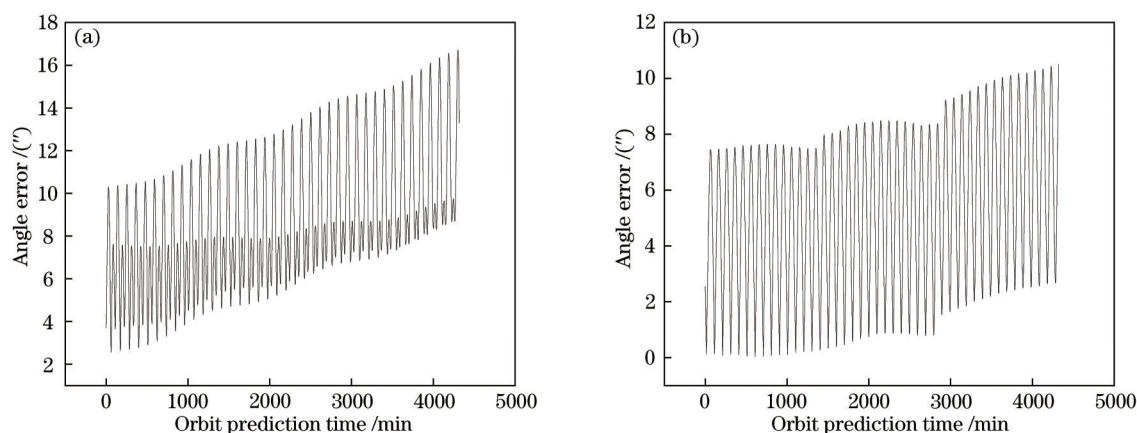


图 2 轨道预报误差。(a) Jason-3;(b) Cryosat-2

Fig. 2 Error of the orbit prediction. (a) Jason-3; (b) Cryosat-2

5 结 论

基于某光电望远镜阵列,选取激光星作为研究对象,对宽视场型光电望远镜的空间目标定轨预报性能进行了初步分析。结果表明,利用宽视场型光电望远镜连续三天的数据,对卫星 Jason-3、Cryosat-2 卫星定轨的位置精度优于 250 m,速度误差小于 0.25 m/s。利用精密定轨结果进行轨道预报,三天的预报精度优于 $20''$ 。宽视场型光电望远镜采用的观测模式具有观测效率高、不需要借助空间目标先验信息等优点,能大幅度提高我国的空间态势感知能力,获得的大量观测数据可应用于空间目标编目的工作中,事后对其观测数据处理得到的空间目标轨道信息可以为有轨道信息需求的工作和空间任务提供数据支持。但上述结论选取的目标和弧段较少,还有待进一步论证,后续需结合大量的数据定性定量分析宽视场型光电望远镜的空间目标定轨预报性能。

参 考 文 献

- [1] ESA's Space Debris Office. Space debris by the numbers[EB/OL]. (2021-01-08) [2021-03-05]. http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers.htm.
- [2] Ding Y G, Sun M G, Li Z W, et al. Observational data analysis of space objects with space debris photoelectric telescope array[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 25-31.
丁一高, 孙明国, 李振伟, 等. 阵列结构型空间碎片光电望远镜观测精度分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 25-31.
- [3] Lei X X, Li Z W, Du J L, et al. Identification of uncatalogued LEO space objects by a ground-based EO array[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(1): 350-359.
- [4] Du J L, Li B, Chen L J, et al. Space debris orbit determination performance analysis using accurate simulated angular and ranging data[J]. Infrared and

- Laser Engineering, 2016, 45(2): 0229004.
- 杜建丽, 李彬, 陈立娟, 等. 空间碎片精密测角和测距仿真数据定轨性能分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0229004.
- [5] Bennett J C, Sang J, Smith C H, et al. Accurate orbit predictions for debris orbit manoeuvre using ground-based lasers[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(11): 1876-1887.
- [6] Changchun Observatory of National Astronomical Observatories. Space debris photo-electric telescope array:CN104570319A[P]. 2015-04-29.
- 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站. 阵列结构型空间碎片光电观测系统: CN104570319A[P]. 2015-04-29.
- [7] Lei X X, Sang J Z, Li Z W. Preliminary analysis of observations obtained from ground-based electro-optical sensor array at Changchun[J]. Journal of Geomatics, 2019, 44(1): 41-44.
- 雷祥旭, 桑吉章, 李振伟. 长春地基光电阵观测数据初步分析[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(1): 41-44.
- [8] Editorial Committee of military training textbooks of the General Armament Department of the Chinese people's Liberation Army. Orbit determination of spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 260-280.
- 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 航天器轨道确定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 260-280.
- [9] Sang J Z, Bennett J C, Smith C H. Estimation of ballistic coefficients of low altitude debris objects from historical two line elements[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(1): 117-124.