

LEO 空间目标的非协同共视观测及初轨确定

陈龙¹, 刘承志^{1,3*}, 李振伟¹, 孙建南¹, 康喆¹, 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;³中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008

摘要 测角数据的初轨确定(IOD)是通过光学观测技术进行空间目标编目的关键,然而对于低地球轨道(LEO)空间目标,地基光学观测所获得的数据弧长较短且不包含距离信息。因此,在进行 IOD 时,所得轨道的误差往往较大,难以应用于进一步的工作中。针对上述问题,研究了 LEO 空间目标的非协同共视观测技术及其初轨确定,并基于统计学提出了一种利用非协同共视观测技术定位空间目标的新方法。结合中国科学院空间目标与碎片观测网的光学测角数据进行了实验验证,结果表明,所提方法对 Ajisai 卫星定位的均方根(RMS)误差小于 100 m,对空间碎片 CZ-2C R/B 定位的 RMS 误差小于 200 m,优于传统的三角视差法。随后,将上述定位结果用于 IOD,所得轨道半长轴的误差在 1 km 左右。

关键词 测量; 光学观测; 空间目标; 共视观测; 初轨确定

中图分类号 P228

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1912003

Non-Cooperative Common-View Observation of LEO Space Objects and Initial Orbit Determination

Chen Long^{1,2}, Liu Chengzhi^{1,3*}, Li Zhenwei¹, Sun Jiannan¹, Kang zhe¹, Deng Shiyu^{1,2}¹Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130117, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Key Laboratory of Space Object & Debris Observation, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China

Abstract Angles-Only initial orbit determination (IOD) is the key to space object cataloguing for optical observation systems. For space objects in Low Earth Orbit (LEO), the observed arcs obtained by ground-based optical observation systems are too short and without range information. Therefore, the IOD results of them have large errors and are unusable in further studies. For this reason, this paper studies the non-cooperative common-view observation technology of LEO space objects and relevant initial orbit determination. Based on statistics, a new method of space object positioning by non-cooperative common-view observation technique is proposed. With optical observations from the space object and debris observation network of the Chinese Academy of Sciences, the experiment is conducted to validate the proposed method. The results show that the root mean square (RMS) error of the proposed method is less than 100 m for the satellite Ajisai and that is less than 200 m for the space debris CZ-2C R/B, which means this method is better than the traditional trigonometric parallax method. The positioning results are then used to IOD, and the obtained semi-major axis errors are around 1 km.

Key words measurement; optical observation; space objects; common-view observation; initial orbit determination

OCIS codes 120.0280; 040.5160; 280.4788; 350.1260

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(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

空间目标主要包括在轨航天器和空间碎片,其中空间碎片如失效卫星、废弃火箭体等是人类太空活动的副产物。据欧洲空间局(ESA)估计,地球轨道上尺寸大于 10 cm 的空间碎片约为 34000 个,而尺寸在 1~10 cm 的空间碎片超过 90 万个^[1]。这些空间碎片广泛分布于地球的低轨道、中轨道以及高轨道区域中,其中低地球轨道(LEO)空间碎片的数量占总数的 67.5%^[2]。监视和编目空间碎片对空间任务的开展与实施至关重要。然而,当前空间目标监视能力有限,截至 2021 年 2 月,全球最大的空间目标监视网——美国空间监视网络发布的在轨已编目空间目标数目仅为 21901 个^[3]。因此,提高空间目标监视以及编目能力迫在眉睫。

目前空间目标监视主要依赖于光学观测系统和雷达观测系统,其中雷达观测系统主要用于监视 LEO 空间目标。光学观测系统主要用于监视中轨道、高轨道空间目标^[4-5]。然而,仅依靠现有的雷达观测系统还不足以监视和编目数量如此庞大的 LEO 空间目标。与雷达观测系统相比,光电探测系统具有建设成本低、探测距离远等优点。随着光学望远镜技术的发展以及光电探测器性能的提高^[6-8],光学观测系统可辅助雷达观测系统去监视 LEO 空间目标。

空间目标的光学观测技术利用光电望远镜收集空间目标的运动图像,通过对收集到的图像进行处理能够获取空间目标的光谱、位置等信息。利用空间目标一次过境的观测弧段计算目标的初始轨道,该过程可简称为初轨确定,初轨确定是利用光学观测技术进行空间目标编目的关键步骤。因为 LEO 空间目标运动速度较快,所以其观测数据的弧长较短。对于传统的初轨确定方法如 Gauss、Laplace、double-r、Gooding 等,往往需要 5~6 min 弧长的测角数据才能够得到较好的初轨结果^[9-10]。但这一般需要对 LEO 空间目标进行全过境弧段的跟踪观测才能实现,极大地限制了观测效率。对于短弧的光学测角数据,使用传统的初轨确定方法进行初轨计算的误差往往较大,难以应用于进一步的空间目标测定轨工作中。针对光学测角数据的短弧定轨问题,研究人员提出了多种改进算法,如文献[11]对传统的 Gauss、Laplace 方法进行了实质性的改进;文献[12]从最优估计角度,研究了短弧资料的初轨确定问题,提出了一种最小二乘估计算法,并给出了相应的参考矢量法。然而,短弧光学测角数据的初轨

确定存在本质的病态性,仅靠改进算法难以从根本上解决问题。故不能希望利用某一种算法来完全克服短弧测角数据定轨的病态性^[13]。因此,在研究发展多种定轨算法的同时,也可以利用多测站或多种类型数据联合定轨的方法来降低短弧测角数据定轨的病态性对初轨确定精度的影响。

本文研究了 LEO 空间目标的非协同共视观测及初轨确定,并基于统计学提出了一种利用非协同共视观测技术定位空间目标的新方法。此外,结合中国科学院空间目标与碎片观测网中长春站、德令哈站、盱眙站的光学测角数据,对 LEO 空间目标的非协同共视观测定位以及初轨确定精度进行了评估。

2 非协同共视观测定位

空间目标的非协同共视观测指两个观测站在事先未约定的情况下,利用光电望远镜对同一空间目标的重叠过境弧段进行共视观测,其示意图如图 1 所示。在图 1 中, O 点为地球质心, T 为空间目标, A 、 B 分别为位于两个观测站的光电望远镜, L_A 、 L_B 分别为光电望远镜 A 、 B 对空间目标视线方向的方向向量。本章介绍了非协同共视观测技术定位空间目标的关键算法,即空间目标的天文定位,时间配准以及空间目标的三维定位。

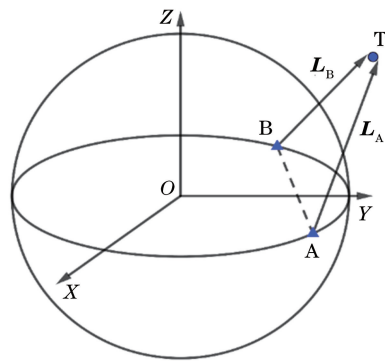


图 1 空间目标的非协同共视观测

Fig. 1 Non-cooperative common-view observation of space object

2.1 空间目标的天文定位

空间目标的光学观测系统利用光电望远镜对空间目标进行跟踪拍照,以获取空间目标的运动图像。图 2(a)、(b)是在非协同共视观测条件下,光电望远镜 A 、 B 获取的空间目标实测图像。其中圆圈标出部分即为通过目标识别所确定的空间目标。在对图像进行目标识别、星象质心提取以及星图匹配等处理后,利用天文定位算法可以计算得到空间目标的角位置。

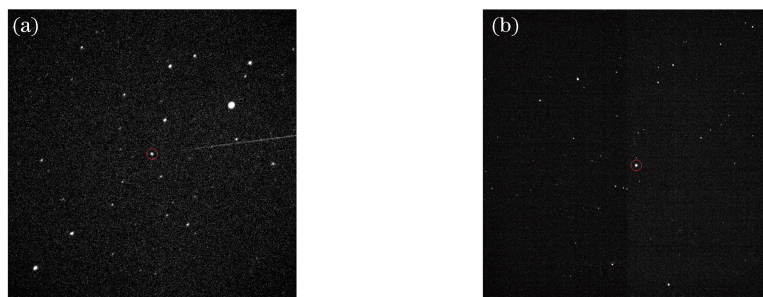


图 2 光电望远镜观测到的空间目标图像。(a)光电望远镜 A;(b)光电望远镜 B

Fig. 2 Images of space objects obtained by photoelectric telescopes. (a) Photoelectric telescope A;
(b) photoelectric telescope B

天文定位是一种利用空间目标与恒星的相对位置来确定空间目标角位置的方法^[13]。利用不同的空间目标图像处理模型,建立空间目标图像中恒星的理想坐标 (ζ, η) 和度量坐标 (x, y) 间的映射关系,然后利用空间目标的度量坐标来定位空间目标。在实际应用中,空间目标图像处理模型有四常数模型、六常数模型以及十二常数模型。通用的空间目标图像处理模型的表达式为

$$\begin{cases} \zeta = \sum_i \sum_j a_{ij} x^i y^j \\ \eta = \sum_i \sum_j b_{ij} x^i y^j \end{cases}, \quad (1)$$

式中: a_{ij} 、 b_{ij} 为待求的模型拟合参数; i 、 j 分别为度量坐标 x 和 y 的幂次。理想坐标系是在切平面上定义的直角坐标系,恒星的理想坐标与其赤道坐标 (α, δ) 一一对应,计算公式为

$$\begin{cases} \zeta = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \\ \eta = \frac{\sin \delta \sin \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (α_0, δ_0) 为空间目标图像中心对应的赤道坐标。

计算空间角位置的具体步骤为:1)选择合适的空间目标图像处理模型。利用(1)、(2)式以及空间目标图像背景恒星的赤道坐标,计算得到模型常数 a_{ij} 和 b_{ij} ,其中背景恒星的赤道坐标从高精度星表中获取。2)将空间目标的度量坐标代入(1)式,得到空间目标图像处理模型,进而计算出目标的理想坐标 (ζ, η) 。3)利用公式计算空间目标的角位置,其表达式为

$$\begin{cases} \tan(\alpha - \alpha_0) = \frac{\zeta}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \\ \tan \delta = \frac{(\eta \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 时间配准

在非协同共视观测条件下,由于两个测站的光学观测系统的初始采样点和采样频率不同,两台光电望远镜难以对空间目标进行同步光学测量,故需要对其中一个观测站的观测数据进行插值计算以得到与另一个测站时间同步的观测数据。插值方法为拉格朗日内插法,内插公式中插值函数和插值多项式的表达式分别为

$$l_k(x) = \frac{(x - x_0) \cdots (x - x_{k-1})(x - x_{k+1}) \cdots (x - x_n)}{(x_k - x_0) \cdots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \cdots (x_k - x_n)}, \quad (4)$$

$$L_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k l_k(x), \quad (5)$$

式中: n 为阶数; x_0, \dots, x_n 为观测数据点所对应的时刻; y_0, \dots, y_n 为观测数据。拉格朗日内插的误差公式为

$$R_n(x) \leq \frac{\max_{a \leq x \leq b} |y^{(n+1)}(x)|}{(n+1)!} \max_{a \leq x \leq b} \left| \prod_{i=0}^n (x - x_i) \right|. \quad (6)$$

2.3 空间目标的三维定位

在实际观测中,由于受光电望远镜测角、时间配准、测站坐标等误差因素的影响(相较于测角误差,后两者可忽略不计),光电望远镜 A、B 对空间目标视线方向的方向向量 \mathbf{L}_A 、 \mathbf{L}_B 一般呈异面关系,因此利用文献[14]中所采用的三角视差法,即利用平面几何关系求解空间目标位置,可能无法得到最优的空间目标位置。本文所提方法是将光电望远镜观测空间目标获得的数据看作随机变量,基于统计学给出空间目标位置的估计值,并将其作为最终确定的空间目标位置。

将 J2000 历元地心惯性系作为空间参考系,协调世界时(UTC)作为时间参考系。将 A、B 两台光

望远镜对空间目标的测角数据看作随机变量 $\theta = (\alpha_A, \delta_A, \alpha_B, \delta_B)$, 设其测角误差分别为 $\sigma_{\alpha_A}, \sigma_{\delta_A}, \sigma_{\alpha_B}, \sigma_{\delta_B}$ 。由于共视观测是在非协同条件下进行的, 因此可假定 θ 中各变量之间互不相关且服从高斯分布, 其期望值为光电望远镜 A、B 分别对空间目标的观测值。在某 UTC 时刻 t 下的光电望远镜 A 的位置坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) , 光电望远镜 B 的位置坐标为 (X_B, Y_B, Z_B) 。两光电望远镜在站心坐标系下对空间目标的观测值为 $\mu = (\alpha_{A_T}, \delta_{A_T}, \alpha_{B_T}, \delta_{B_T})$, 则光电望远镜 A、B 对空间目标的测角位置的概率密度函数为

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi^2 |\mathbf{M}|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{(\theta - \mu)^T \mathbf{M}^{-1} (\theta - \mu)}{2} \right], \quad (7)$$

$$\text{式中: } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha_A}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta_A}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \sigma_{\alpha_B}^2 & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{\delta_B}^2 \end{bmatrix}。 \text{对(7)式进行换}$$

元, 得到其关于变量 $X(x, y, z)$ 的表达式

$$p(X) = \frac{1}{4\pi^2 |\mathbf{M}|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{(\mathbf{X}_T - \mu)^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{X}_T - \mu)}{2} \right], \quad (8)$$

式中: 当 (x, y) 在第一象限和第二象限时, $\mathbf{X}_T = (s_1, s_2, s_3, s_4)$, 其中 $s_1 = \arccos \frac{x - X_A}{\sqrt{(x - X_A)^2 + (y - Y_A)^2}}$, $s_2 = \arctan \frac{z - Z_A}{\sqrt{(x - X_A)^2 + (y - Y_A)^2}}$, $s_3 = \arccos \frac{x - X_B}{\sqrt{(x - X_B)^2 + (y - Y_B)^2}}$, $s_4 = \arctan \frac{z - Z_B}{\sqrt{(x - X_B)^2 + (y - Y_B)^2}}$; 当 (x, y) 在第三象限和第四象限时, $\mathbf{X}_T = (s_5, s_6, s_7, s_8)$, 其中 $s_5 = \arccos \frac{x - X_A}{\sqrt{(x - X_A)^2 + (y - Y_A)^2}} + \pi$, $s_6 = \arctan \frac{z - Z_A}{\sqrt{(x - X_A)^2 + (y - Y_A)^2}}$, $s_7 = \arccos \frac{x - X_B}{\sqrt{(x - X_B)^2 + (y - Y_B)^2}} + \pi$, $s_8 = \arctan \frac{z - Z_B}{\sqrt{(x - X_B)^2 + (y - Y_B)^2}}$ 。

(8)式是空间目标三维位置的概率密度函数, 是(7)式经过非线性变换所得, 其不再服从高斯分布。本文将(8)式的期望值作为最终确定的空间目标位置。

利用蒙特卡罗方法可以计算任意复杂概率分布的期望值。蒙特卡罗方法是一种统计模拟方法, 可以通过随机数来解决一些数值计算问题。利用蒙特卡罗方法对(8)式进行随机采样, 得到的一组样本点可以近似表示空间目标位置的概率分布, 计算这组样本点的期望值并将其作为最终空间目标的位置。根据大数定律, 随机采样的样本点数越多, 计算所得期望值越趋近于真实期望值, 算法的具体过程为

1) 从 $p(X)$ 中随机采样得到 N 个样本点, 记为 $X_i (i=1, \dots, N)$ 。

2) 计算每个样本点的权重 $W_i = p(X_i)$ 。

3) 利用随机采样得到的样本点及其权重计算出空间目标位置, 即 $X_S = \sum_{i=1}^N W_i X_i$ 。

3 结果与讨论

利用中国科学院空间目标与碎片观测网中长春站、德令哈站、盱眙站的光学测角数据以及长春站的碎片激光测距(DLR)数据, 结合 2.3 节中的空间目标定位方法, 研究了非协同共视观测技术对 LEO 空间目标的定位精度, 并对其初轨确定结果进行了

分析。

将卫星 Ajisai 以及空间碎片 CZ-2C R/B 作为研究对象, 它们的轨道参数如表 1 所示。为了分析对比 2.3 节中统计学法与三角视差法对空间目标的定位精度, 分别利用这两种方法结合时间配准算法, 对 2020 年 10 月 7 日、8 日和 10 日长春站和盱眙站对空间碎片 CZ-2C R/B 的非协同共视观测数据, 以及 2020 年 10 月 11 日~13 日长春站和德令哈站对卫星 Ajisai 的非协同共视观测数据进行处理, 进而得到卫星 Ajisai 和空间碎片 CZ-2C R/B 的三维位置数据。将得到的三维位置数据与参考轨道位置进行对比, 表 2 为三角视差法和统计学法位置误差的均方根(RMS)。Ajisai 卫星的参考轨道位置来源于对国际激光测距服务提供的卫星激光测距数据的精密定轨, 定轨精度小于 10 cm。空间碎片 CZ-2C R/B 的参考轨道位置来源于对中国科学院空间目标与碎片观测网光学测角数据和长春站 DLR 数据的联合精密定轨, 定轨过程中根据两种不同类型数据的测量精度进行加权, 定轨精度能够达到 m 量级^[15]。

表 1 空间目标的轨道参数

Table 1 Orbital parameters of space objects

Space object	NORAD (The North American Air Defense Command) Number	Eccentricity	Mean altitude /km
CZ-2C R/B	31114	0.00607	834.7
Ajisai	16908	0.00113	1494.7

表 2 三角视差法和统计学法位置误差的均方根

Table 2 RMS position errors of trigonometric parallax method and statistics method

Space object	Date	Trigonometric parallax method				Statistics method			
		x	y	z	3D	x	y	z	3D
CZ-2C R/B	20201007	156.25	141.49	99.69	233.18	45.79	94.03	70.11	125.92
	20201008	264.12	149.21	78.01	313.22	126.42	94.52	21.64	159.32
	20201010	423.00	61.93	101.94	439.50	170.48	34.71	41.55	178.87
Ajisai	20201011	64.54	44.15	39.29	87.51	28.98	30.46	36.89	55.93
	20201012	56.92	95.32	40.56	118.20	42.56	74.81	37.84	94.02
	20201013	67.87	36.48	43.89	88.68	43.46	24.29	30.23	58.25

从表 2 中可以看出,统计学法对卫星 Ajisai 的定位精度小于 100 m,对空间碎片的定位精度小于 200 m,定位结果优于三角视差法。分析光电望远镜测角、时间配准以及测站坐标对最终定位误差的影响。其中,测站坐标是通过高精度的大地测量获得,精度可达 cm 量级。对于时间配准,利用控制变量的方法模拟仅存在时间配准误差的实验以获得仿真数据,再计算空间目标的位置,结果表明时间配准误差对最终位置误差影响不超过 1 m。因此,相对于测角误差,测站坐标以及时间配准误差可以忽略不计。由于上述三种误差的存在,因此两测站光电望远镜对空间目标视线方向的方向向量所在直线为异面直线。此时,无法通过求解两直线的交点来确定空间目标的位置,进而利用不同的计算空间目标位置方法所得到的结果往往不同。两条异面直线之间的距离为 d ,能够从一定程度上反映出光电望远镜测角误差的大小。对于目标较大且明亮的卫星,

光电望远镜的测角误差相对较小, d 也偏小。从表 2 中可以看出,两种方法对 Ajisai 卫星的定位结果相差不大。而对于暗弱的空间碎片,测角误差偏大, d 也偏大。统计学法比三角视差法的定位精度提升了 100 m 以上。

为了对比单站测角数据与非协同共视观测定位数据初轨确定的差异,计算了用于非协同共视观测定位 18 个测角弧段的单站测角数据的初轨确定算例,以及 9 个非协同共视观测定位数据的初轨确定算例。对于前者,初轨计算采用的是 improved-Laplace 法,对于后者,初轨计算采用的是 Herrick-Gibbs 法。将所有初轨确定结果与参考轨道进行对比,将轨道的半长轴(SMA)作为衡量初始轨道误差的标准,参考轨道通过精密定轨得到。两种算例的 SAM 误差如表 3 所示,其中对于单站测角数据的初轨确定算例,表 3 中列出的结果是同一天两个测站初轨计算结果中误差较小的一个。

表 3 两种算例的 SAM 误差

Table 3 The SMA errors of two cases

Space object	Date	SMA error of non-cooperative common-view /km	SAM error of single site /km
CZ-2C R/B	20201007	1.028	5.272
	20201008	1.573	6.375
	20201010	1.287	5.518
Ajisai	20201011	0.824	4.375
	20201012	1.134	5.022
	20201013	0.928	3.958

从表 3 中可以看出,在单站测角数据的初轨确定算例中,初始轨道的 SAM 误差在 5 km 左右。在非协同共视观测定位数据的初轨确定算例中,初始

轨道的 SAM 误差在 1 km 左右。初轨确定误差的大小受多种因素影响,如观测数据误差的大小、弧段的长度以及数据点的稀疏等,在本研究中可近似认

为两种算例的条件相同。单站光学观测所获取的是空间目标二维测角数据,由于缺少距离信息的限制,因此初轨确定误差较大。而通过非协同共视观测技术定位空间目标,可以将两个测站的二维光学测角数据转换为包含距离信息的三维位置数据,在距离信息的限制下,初轨确定结果有了明显的改善。

4 结 论

利用中国科学院空间目标与碎片观测网中长春站、德令哈站、盱眙站的光学测角数据,研究了 LEO 空间目标的非协同共视观测技术及其初轨确定,并基于统计学提出了一种利用非协同共视观测技术定位空间目标的新方法。结果表明,所提方法对 Ajisai 卫星的定位误差小于 100 m,对空间碎片 CZ-2C R/B 的定位误差小于 200 m,结果整体优于传统的三角视差法。对于光电望远镜测角误差较大的情况,所提方法的定位精度明显高于三角视差法。与单站测角数据的初轨确定相比,非协同共视观测定位数据的初轨确定结果更加可靠。非协同共视观测技术可以辅助雷达观测系统对 LEO 空间目标进行探测、编目和维护。由于该研究所涉及的空间目标和观测弧段较少,因此上述结论还有待进一步验证。但是,该研究结果为空间目标的非协同共视观测技术的进一步研究提供了参考。此外,利用非协同共视观测技术定位空间目标的定位精度不仅与光电探测设备的探测性能有关,还与测站和空间目标之间的观测几何有很大的关系,是接下来值得研究的工作之一。

参 考 文 献

- [1] ESA's Space Debris Office. Space debris by the numbers [EB/OL]. (2021-01-08) [2021-04-12]. http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers.htm.
- [2] Wagner P, Hampf D, Riede W. Passive optical space surveillance system for initial LEO object detection [C]//66th International Astronautical Congress, October 12-16, 2015, Jerusalem, Israel. [S. l.: s. n.], 2015.
- [3] National Aeronautics and Space Administration. Space debris quarterly news: report of national aeronautics and space administration [R]. Washington, D.C.: NASA, 2021, 25 (1): 1-12.
- [4] Klinkrad H. Space debris: models and risk analysis [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [5] Schildknecht T, Musci R, Ploner M, et al. Optical observations of space debris in GEO and in highly-eccentric orbits [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(5): 901-911.
- [6] Zhou M Y, Hou J F, Wang D G, et al. Design and verification of depolarized derotator alignment scheme in astronomical telescope [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0604005.
周明尧, 侯俊峰, 王东光, 等. 天文望远镜无偏消旋镜装调方案设计及验证 [J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0604005.
- [7] Ai K, Cheng J J, Zhu K F, et al. Design and realization of a novel poly-silicon light-emitting device based on standard CMOS technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701011.
艾康, 程骏骥, 朱坤峰, 等. 基于标准 CMOS 技术的新型多晶硅发光器件的设计与实现 [J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701011.
- [8] Yao P P, Xu S L, Tu B H, et al. Design of performance test system and analysis of temperature dependence for space-borne array CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0910001.
姚萍萍, 许孙龙, 涂碧海, 等. 星载面阵 CCD 性能测试系统设计及温度影响分析 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0910001.
- [9] Escobal P R. *Methods of orbit determination* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- [10] Vallado D A, Carter S S. Accurate orbit determination from short-arc dense observational data [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1998, 46(2): 195-213.
- [11] Milani A, Gronchi G F, de Farnocchia D, et al. Topocentric orbit determination: algorithms for the next generation surveys [J]. *Icarus*, 2008, 195(1): 474-492.
- [12] Jia P Z, Wu L D. A reference vector algorithm for the initial orbit computation [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1997, 38(4): 353-358.
贾沛璋, 吴连大. 初轨计算的参考矢量法 [J]. *天文学报*, 1997, 38(4): 353-358.
- [13] Wu L D. *Orbits and detection of satellite and space debris* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.
吴连大. *人造卫星与空间碎片的轨道和探测* [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
- [14] Earl M A. Determining the range of an artificial satellite using its observed trigonometric parallax [J]. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 2015, 99(2): 50.
- [15] Chen Y L, Huang Y, Hu X G, et al. Space target's orbit determination using CCD and SLR techniques [J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory, CAS*, 2014, 35(1): 112-121.
陈艳玲, 黄勇, 胡小工, 等. CCD 测角与激光测距技术综合测定空间目标的轨道 [J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2014, 35(1): 112-121.