

一种多光电设备观测空间碎片能力仿真分析

胡静静^{1**}, 胡绍明^{1*}, 刘静², 陈旭¹, 杜俊举¹

¹ 山东大学空间科学研究院山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209;

² 中国科学院国家天文台国家航天局空间碎片监测与应用中心, 北京 100101

摘要 针对不同口径的光电探测设备组合设计两种扫描方式, 建立多光电设备组合探测能力的评估模型。从望远镜的扫描方式、排列方式和口径等方面对模型进行仿真分析, 并对仿真结果进行能力评估。仿真结果表明: 针对选择已编目的空间碎片数据集, 在仿真时间段, 单仰角区域扫描的探测结果优于多仰角区域扫描; 相同视场下, 4 台 28 cm 口径的望远镜组合的探测碎片数比 15 cm 口径的望远镜组合仅提高 2.4% (单仰角区域扫描) 和 3.6% (多仰角区域扫描)。若观测需求为维持现有空间碎片的编目, 建议选择性价比更高的 15 cm 口径的望远镜组合, 若观测需求为能够探测更小尺寸的空间碎片, 建议选择 28 cm 口径的望远镜组合。

关键词 探测器; 光电设备; 空间碎片; 探测能力评估模型; 观测策略

中图分类号 P12 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1504002

Simulation Analysis of Space Debris Observation Capability of Multi-Optoelectronic Equipment

Hu Jingjing^{1**}, Hu Shaoming^{1*}, Liu Jing², Chen Xu¹, Du Junju¹

¹ Shandong Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China;

² Space Debris Monitoring and Application Center of China National Space Administration, National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100101, China

Abstract In this study, two scanning methods are designed by combining photoelectric detection equipment having different apertures. Further, a capability evaluation model is established for the multi-photoelectric detection equipment. The model is simulated and analyzed from the scanning mode, arrangement mode and aperture of the telescope, and the simulation results are evaluated. The simulation results show that for the selected catalog space debris dataset, the detection results obtained via single-elevation-area scanning are better than those obtained via multi-elevation-area scanning during the simulation time period. Under the same field of view, the number of debris detected using a combination of four 28-cm-aperture telescopes increases only by 2.4% (single-elevation-area scanning) and 3.6% (multi-elevation-area scanning) when compared with those detected using a 15-cm-aperture telescope combination. The considerably cost-effective 15-cm-aperture telescope combination must be selected to maintain a catalog of the existing space debris, and the 28-cm-aperture telescope combination must be selected for detecting small-sized space debris.

Key words detectors; optoelectronic equipment; space debris; detection capability evaluation model; observation strategies

OCIS codes 040.1880; 040.1520; 230.2090

1 引言

空间碎片的地基观测设备主要为雷达和光电望远镜。其中雷达具有全天时、全天候工作的特点, 但

其探测能力受探测距离的影响较大, 接收的碎片信号强度与探测距离的 4 次方成反比, 主要应用于低轨空间碎片的探测; 光电望远镜受天气和气候的影响较大, 且不能全天时观测, 光电望远镜的观测条件

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-04-23; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 山东省自然科学基金(JQ201702)、山东大学青年学者未来计划(20820162003)

* E-mail: husm@sdu.edu.cn; ** E-mail: hjj7211@163.com

须满足测站在太阳光照阴影区、碎片在太阳光照区,接收的碎片信号强度与探测距离的平方成反比,一般应用于雷达观测受限的中高轨空间碎片的观测。

国外学者在建设设备前,对望远镜观测空间碎片的性能进行仿真,既可以得到观测效果较优的布站方式,也可以得到多台望远镜设备较优的排列组合方式,为望远镜参数的选择提供参考;设备建成后,通过仿真可以对不同观测方式的望远镜性能进行评估分析,从而对观测策略进行优化选择,为观测计划的制定提供参考。在望远镜的性能评估方面,美国 AGI 公司研制的系统工具箱 (STK) 软件可对空间碎片的过境情况进行模拟;欧洲航天局 (ESA) 的雷达和光学望远镜观测预报 (PROOF) 软件可对空间碎片的过境情况和探测性能进行分析。

Donath 等^[1-2]针对 ESA 提出的欧洲空间监视系统的布站方式设计了两种方案,又对地球同步轨道 (GEO) 的覆盖率进行比较,定量分析增加的观测台站对 GEO 空间物体观测数量的影响。Flohrer 等^[3-4]和 Schildknecht 等^[5]针对 ESA 的 GEO 观测网建设,利用 PROOF 软件来评估探测器的性能,分析研究了计划中的欧洲光学 GEO 卫星观测系统的性能,并提出了一个需要 3~4 个站点的 GEO 卫星观测系统。Olmedo 等^[6-7]对 GEO 碎片观测的编目能力进行了仿真,并使用 ESA 资助研发的先进空间监测系统仿真器 (AS4) 分析了欧洲空间态势感知系统的覆盖性能、及时性和定轨精度。Carolin 等^[8]在欧洲空间光学监测网的任务计划中,对碎片的选择和探测器设备参数的影响等进行了分析。Vananti 等^[9]对空间监视的光学子系统进行了初步的设计和分析。Musci 等^[10]对多个站点观测的高纬度碎片进行了分析。Utzmann 等^[11]对欧洲空间监视与跟踪系统的结构设计进行了性能评估。Mokhnatkin 等^[12]根据观测结果,在俄罗斯国际科学光学监测网 (ISON) 项目中,对墨西哥的两台望远镜观测大偏心率轨道 (HEO) 和 GEO 轨道碎片的效率进行了比较。Hinze 等^[13]基于协方差理论并结合 GEO 的编目需求,对 ESA 特内里费泰德空间碎片望远镜 (ESASDT) 和齐美尔瓦尔德激光和天文望远镜 (ZIMLAT) 的观测策略进行了分析。Cordelli 等^[14]根据协方差理论优化 GEO 和地球同步转移轨道 (GTO) 空间碎片的观测策略。Silha 等^[15]根据需要观测的中地球轨道 (MEO) 的轨道特性来制定观测策略,仿真了 ESASDT 望远镜对该类碎片的观测效率。美国空军航天司令部

(AFSPC) 资助开发了空间监视网分析模型 (SSNAM)^[16],其用于分析和构建空间监视网 (SSN) 的架构体系,也可用于模拟分析编目管理和特殊事件 (发射、在轨事件和解体时间)。美国学者主要描述设备或监测系统本身的能力来分析光电设备的性能,如电荷耦合器件 (CCD) 碎片望远镜 (CDT) 的口径为 32 cm,最小观测 GEO 碎片尺寸为 60 cm^[17],米级自主望远镜 (MCAT) 的口径为 1.3 m,最小观测 GEO 碎片尺寸为 13.5 cm^[18]。光电设备除了探测中高轨碎片外,欧美等国家的学者还将其作为雷达设备的候补,对低地球轨道 (LEO) 碎片进行观测和评估^[19-20]。

近年来,我国在空间碎片领域的观测方面发展迅速,用于观测空间碎片的光电设备逐年增加,一些传统的天文光电设备也开始对空间碎片进行观测,以提高设备的利用率。对于望远镜探测空间碎片能力的仿真需求强烈,我国也开始了这方面的研究。目前,国内的研究主要针对探测设备本身的能力分析^[21-22]和探测能力评估模型的建模^[23-24]两个方面,并进行了一些具体的应用研究,如研究多个相机在空间目标观测中^[25]的探测能力,主要利用 STK 和 PROOF 等国外软件对设备及观测策略等进行性能仿真分析。

本文针对一种多个望远镜设备组合的排列方式设计了两种扫描方式,建立了多光电设备组合探测能力的评估模型,通过对模型的仿真结果进行能力评估分析,可以为用于空间碎片观测的多光电探测设备组合的设计和观测策略的选择提供参考建议。依据评估模型,选择威海天文台对观测空间碎片的性能进行仿真分析,设计了 15 cm 和 28 cm 两种小口径、大视场望远镜组合的多种方案,主要目的是尽可能探测更多数量的碎片,对不同方案的探测能力进行仿真比较,以解决多台望远镜设备组合的排列和扫描方式等选择问题。

2 多光电设备组合的探测能力评估模型

多光电设备组合的探测能力评估模型在单设备的探测能力评估模型^[23]的基础上,增加了设备组合的排列方式和扫描方式的设计,将其与碎片的可探测性计算模型相结合,可得到空间碎片的探测数量和弧段数等信息。同时,针对不同口径的探测设备,可以通过计算其极限探测尺寸来得到设备本身的探测性能。多光电设备组合的探测能力评估模型的探

测流程如图 1 所示。

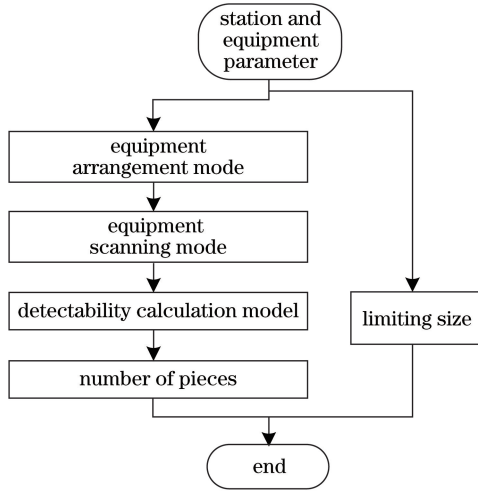


图 1 多光电设备组合的探测能力评估模型的探测流程
Fig. 1 Schematic of detection process of evaluation model for combined detection capability of multiple optoelectronic equipment

图 1 中,首先输入测站和设备参数,之后进行设备组合的排列方式和扫描方式的定量化,并结合碎片的可探测性计算模型,得到碎片的探测数量,也可直接由测站和设备参数计算得到极限探测尺寸,最后输出探测碎片数量、过视场时段等信息。

2.1 节介绍仿真所需的设备信息等参数,并根据选择的排列方式设计两种扫描方式;2.2 节介绍碎片的可探测性计算模型和光电设备的极限探测尺寸计算模型。

2.1 光电设备组合的排列及扫描方式的设计

观测空间碎片的光电设备包括望远镜和 CCD 探测器。当计算信噪比时,均将曝光时间作为计算空间碎片信号量的积分时间。

实验对多个望远镜采用 $a \times b$ 的视场拼接模式,假设望远镜在仰角方向并排放置 b 行,在方位角的垂直方向并排放置 a 列,则望远镜总个数为 $a \times b$ 。

扫描方式分为单仰角区域扫描和多仰角区域扫描。单仰角区域扫描指扫描过程中固定望远镜指向的仰角,在方位角方向进行扫描观测。多仰角区域扫描指扫描过程中在仰角和方位角方向均可以进行扫描观测。

单仰角区域扫描的具体步骤如下。

1) 在初始指向的仰角不变的情况下,从初始指向的方位角开始,每次在方位角方向移动角度为 $a \sqrt{x_{FOV}} / \cos(A_{lt})$ (其中 x_{FOV} 为视场(FOV), A_{lt} 为仰角),直到方位角大于方位角的极限值(360°)。

2) 返回初始指向,重复步骤 1),直到仿真时间结束。

多仰角区域扫描的步骤是在单仰角区域扫描的步骤 1)和步骤 2)之间增加一个步骤:当方位角大于 360° 时,进入下一个仰角范围(仰角增加 $b \sqrt{x_{FOV}}$)继续扫描,此时方位角回归初始指向的方位角再进行步骤 1)操作,步骤 1)结束后计算下一个仰角范围,判断该范围内望远镜指向的仰角是否大于设定的最大仰角值,若大于,则仿真结束,反之,重复上面的操作,直到仰角值大于指向最大仰角值。

2.2 探测能力评估模型

实验使用的可探测性计算模型参考文献[23],并在此基础上针对运行时间进行改进。针对文献[23]中关于空间碎片能否被望远镜 CCD 探测到,从信号学的角度出发,计算每个像素的信噪比并与 CCD 探测的阈值进行比较。实验对每个像素的信噪比计算改为对空间碎片整体的信噪比计算,信噪比(SNR)的表达式为

$$R_{SNR} = \frac{S_{obj}}{\sqrt{S_{obj} + (\pi r^2) \cdot (S_{back} + k_{dark} \cdot t_{int} + k_{rdout}^2)}} \quad (1)$$

式中: S_{obj} 为 CCD 接收过视场空间碎片反射太阳光的辐射量; S_{back} 为夜天光背景辐射量; t_{int} 为积分时间; k_{dark} 和 k_{rdout} 分别为 CCD 的暗流和读出噪声; r 为测光半径。

改进后的模型,计算 S_{obj} 时只需计算 CCD 接收空间碎片反射的光信号辐射量的总值。文献[23]因为利用单个像素的点扩展函数来计算每个像素的信号值,这些值可以仿真生成仿真观测图像,而改进后的模型不需要生成观测图像,所以为了减少程序的运行时间,改为计算整个碎片在 CCD 上成像的光斑信噪比。

当比较望远镜口径对探测能力的影响时,需要计算望远镜的极限探测尺寸。根据(1)式,通过调整碎片尺寸来计算信噪比,如果信噪比大于(小于)探测的阈值,减小(增加)碎片尺寸继续计算信噪比,直到达到探测的阈值。将所提方法与文献[3]方法进行比较,假设望远镜的口径为 1 m,空间碎片反照率为 0.1,相位角为 0° ,积分(曝光)时间为 2 s,探测阈值为 10,得到所提方法的斜距为 36000 km,空间碎片的最小探测尺寸为 0.213 m,文献[3]对应的尺寸为 0.21 m,误差约为 1.4%,望远镜探测空间碎片的最小尺寸与文献[3]的结果基本一致。

3 仿真分析

对单仰角区域扫描进行仿真,假设望远镜组合指向的仰角为 35° ;对多仰角区域扫描进行仿真,假设望远镜组合初始指向的仰角为 35° ,最大仰角不

超过 90° 。

3.1 望远镜参数的选择

实验设计两种不同口径的光电设备组合。望远镜和 CCD 参数的设置如表 1 所示。测站位置选择山东威海,基本仿真参数如表 2 所示。

表 1 望远镜参数和 CCD 参数的设置

Table 1 Setting of telescope parameters and CCD parameters

Telescope parameter					CCD parameter				
Aperture / cm	FOV / $[(^\circ)\times(^\circ)]$	Single pixel FOV / ($''$)	Transmittance	Metering aperture / pixel	$k_{\text{dark}} / (\text{electron}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pixel}^{-1})$	$K_{\text{rdout}} / \text{electron}$	Quantum efficiency	Detection threshold	
15	12×12	12.38	0.7	3	0.15	3.7	0.7	5	
28	6×6	6.99	0.7	5	0.15	3.7	0.7	5	

表 2 仿真基本参数的设置

Table 2 Setting of simulation basic parameters

Exposure time / s	Albedo	Band range / nm	Duration / h
1.0	0.2	380-780	12

仿真中的空间碎片集和其轨道参数从美国 space-track 网站的编目数据库中获得。实验选取该网站的 2019 年 7 月 1 日双行根数(TLE),仿真中所需的碎片尺寸采用 PROOF 软件中的数据,对该

软件中未收录的碎片尺寸均假设为 1 m。

3.2 不同扫描方式和不同排列方式望远镜组合的探测仿真

为了仿真不同扫描方式和不同排列方式对望远镜组合的探测结果,分别选择口径为 15 cm 的望远镜组合和 28 cm 的望远镜组合,按照不同扫描方式和不同排列方式进行仿真,探测结果如表 3~6 所示,其中表 3~5 为 3 个不同观测夜的结果(2019 年 7 月 1 日,2019 年 12 月 1 日和 2019 年 12 月 5 日)。

表 3 15 cm 口径的望远镜组合在 2019 年 7 月 1 日的探测结果

Table 3 Detection results of 15 cm aperture telescope combination on July 1, 2019

Mode	Single-elevation-area scanning		Multi-elevation-area scanning	
Arrangement	6×1	3×2	6×1	3×2
Number of arcs	8513	8967	6092	6087
Number of pieces	1486	1526	1298	1349
Total detection time / s	286089.2	286288.2	201545.6	196110.4

表 4 15 cm 口径的望远镜组合在 2019 年 12 月 1 日的探测结果

Table 4 Detection results of 15 cm aperture telescope combination on December 1, 2019

Mode	Single-elevation-area scanning		Multi-elevation-area scanning	
Arrangement	6×1	3×2	6×1	3×2
Number of arcs	8481	10277	7945	7878
Number of pieces	1219	1342	1209	1303
Total detection time / s	280906.6	320303.8	254221.1	246617.4

表 5 15 cm 口径的望远镜组合在 2019 年 12 月 5 日的探测结果

Table 5 Detection results of 15 cm aperture telescope combination on December 5, 2019

Mode	Single-elevation-area scanning		Multi-elevation-area scanning	
Arrangement	6×1	3×2	6×1	3×2
Number of arcs	6181	7378	5915	5853
Number of pieces	1273	1463	1281	1400
Total detection time / s	204944.8	230270.5	187841.9	182389.1

表 6 28 cm 口径的望远镜组合在不同扫描方式和不同排列方式下的探测结果
Table 6 Detection results of 28 cm aperture telescope combination under different scanning methods and different arrangements

Mode	Single-elevation-area scanning		Multi-elevation-area scanning	
Arrangement	4×1	2×2	4×1	2×2
Number of arcs	1809	1761	993	1153
Number of pieces	487	506	409	486
Total detection time /s	59184.1	57289.3	33166.0	38617.6

从表 3~5 可以看到,仿真时段内,对 15 cm 口径的望远镜组合在单仰角区域扫描和多仰角区域扫描的两种扫描方式下,3×2 排列方式的探测结果均优于 6×1 排列方式。从表 6 可以看到,仿真时段内,对 28 cm 口径的望远镜组合在单扫描方式下,4×1 排列方式的探测弧段数和探测总时长均优于 2×2 排列方式,但探测碎片数则少于后者,多扫描方式下,2×2 排列方式的探测结果均优于 4×1 排列方式。对两种口径和两种扫描方式,单仰角区域扫描的探测结果优于多仰角区域扫描。原因在于单仰角区域扫描对应的为低仰角区

域,经过低仰角区域的碎片数量整体上多于经过高仰角区域。

3.3 望远镜组合不同口径的探测仿真

为了分析望远镜口径对探测性能的影响,相同视场下,对两种口径的望远镜组合进行比较。对于 15 cm 口径的望远镜,选择 1 台 15 cm 口径的望远镜的方案,对于 28 cm 口径的望远镜,选择 4 台 28 cm 口径的望远镜组合方案,这两种方案的视场相同,对两种扫描方式进行仿真,仿真结果如表 7 和表 8 所示,其中表 8 仿真的天光背景每平方角秒为 20.5 星等。

表 7 相同视场不同口径的望远镜组合的探测结果

Table 7 Detection results of combination of telescopes with different apertures in same field of view

Mode	Single-elevation-area scanning		Multi-elevation-area scanning	
Arrangement	1×1	2×2	1×1	2×2
Aperture /cm	15	28	15	28
Number of arcs	1658	1761	1102	1153
Number of pieces	494	506	469	486
Total detection time /s	54139.3	57289.3	37087.6	38617.6

表 8 不同口径的望远镜组合在不同轨道高度下可探测的最小碎片尺寸

Table 8 Limiting size of debris detectable at different orbital heights by telescopes of different diameters

Height /km	Limiting size (15 cm) /m	Limiting size (28 cm) /m
2000	0.08	0.06
20000	0.77	0.56
36000	1.38	1.00

两种扫描模式下,从表 7 可以看到,仿真时段内,28 cm 口径的望远镜组合探测的碎片数比 15 cm 口径的望远镜组合分别提高 2.4%(单仰角区域扫描)和 3.6%(多仰角区域扫描),总体结果相差不大。表 8 为一台 15 cm 望远镜与 4 台 28 cm 望远镜组合(两种方案的视场相同)的比较结果,但是从天文观测原理来看,理论上 28 cm 口径的望远镜

组合应该可以探测到尺寸更小的碎片,因此可以观测到更多数量的碎片。为了进一步解释这一现象,对这两种口径的望远镜组合在三种典型轨道高度上探测的最小碎片尺寸进行定量计算。从表 8 可以看到,28 cm 口径的望远镜组合在不同轨道高度上的最小碎片尺寸均小于 15 cm 口径的望远镜组合。综合表 7 和表 8 可以看到,出现一台 15 cm 口径的望远镜与 4 台 28 cm 口径的望远镜组合的探测数量相差不大的现象,考虑原因为现有编目库中在这两个极限尺寸之间的编目碎片数量较少。因此,当观测需求为维持且现有编目碎片预算有限时,选择性价比更高的 15 cm 口径的望远镜组合更适合;当观测需求为探测尽可能多的空间碎片时,选择能够探测更小碎片尺寸的 28 cm 口径的望远镜组合;当观测需求为全天区覆盖,需要选择多区域扫描的组合等。

4 结 论

针对多台望远镜组合的不同排列方式和扫描方式,建立多光电设备组合的探测能力评估模型,并以威海天文台为例,进行两种口径望远镜组合的设计和观测策略的仿真分析。望远镜组合的设计应在明确需求的基础上进行选择,望远镜的口径可根据观测需求和预算进行选择。

在仿真时间段,对于 15 cm 口径的望远镜组合,显然选择 3×2 排列方式得到的探测碎片数量优于 6×1 排列方式;对 28 cm 口径的望远镜组合,显然选择 2×2 排列方式得到的探测结果优于 4×1 排列方式;对两种口径的望远镜组合,单仰角区域扫描(35° 指向的仰角)的探测结果均优于多仰角区域扫描;对两种口径的望远镜组合在现有的公开编目数据库中,视场对探测碎片数量的影响大于口径的影响。根据不同的观测需求选择不同的望远镜组合,如维持空间碎片的编目需求,需要选择探测碎片数量最多的组合;观测更小尺寸的碎片需求,需要选择口径大的组合;全天区覆盖需求,需要选择多仰角区域扫描的组合等。另外,关于空间碎片探测数量的仿真,由于在不同的仿真时间段,编目库中碎片数量也不同,且碎片的轨道参数可能发生变化,所以不同观测时段的仿真结果也会有变化。

计算信噪比时,选用了跟踪空间碎片的观测模式对信号辐射量进行计算,后续工作将增加对望远镜观测时指向固定或指向凝视恒星不动时,计算信号辐射量。另外,在后续的仿真工作中将进一步考虑添加晴天数等因素对观测的影响,从而可以使仿真环境更加接近真实,模拟更多的观测方式,更有利于多台望远镜组合的设计和观测。

参 考 文 献

- [1] Donath T, Schildknecht T, Brousse P, et al. Proposal for a European space surveillance system[C]//4th European Conference on Space Debris, April 18-20, 2005, Darmstadt, Germany. Paris: European Space Agency, 2005: 31-38.
- [2] Donath T, Schildknecht T, Martinot V, et al. Possible European systems for space situational awareness[J]. Acta Astronautica, 2010, 66(9/10): 1378-1387.
- [3] Flohrer T, Schildknecht T, Musci R, et al. Performance estimation for GEO space surveillance [J]. Advances in Space Research, 2005, 35(7): 1226-1235.
- [4] Flohrer T, Schildknecht T, Musci R. Proposed strategies for optical observations in a future European space surveillance network[J]. Advances in Space Research, 2008, 41(7): 1010-1021.
- [5] Schildknecht T, Flohrer T, Musci R. Optical observations in a proposed european space surveillance network[C]//Proceedings of the 6th US Russian Space Surveillance Workshop, August 22-26, 2005, Petersburg, Russia. [S.l.: s.n.]: 2005.
- [6] Olmedo E, Nomen J, Sánchez-Ortiz N, et al. Cataloguing capability of objects in the GEO ring[EB/OL]. (2019-01-31) [2020-02-27]. https://www.researchgate.net/publication/288659391_Cataloguing_capability_of_objects_in_the_geo_ring.
- [7] Olmedo E, Sánchez-Ortiz N, Guijarro N, et al. Survey-only optical strategies for cataloguing space debris objects in the future European space surveillance system[J]. Advances in Space Research, 2011, 48(3): 535-556.
- [8] Carolin F, Schildknecht T, Hinze A, et al. Optical observation campaign in the framework of the ESA space surveillance system precursor services[C]//Proceedings of the European Space Surveillance Conference, June 7-9, 2011, Madrid, Spain. [S. l.: s. n.], 2011.
- [9] Vananti A, Schildknecht T, Keinänen P, et al. Preliminary telescope design analysis for the optical space surveillance subsystem[C]//61st International Astronautical Congress 2010, September 27-October 1, 2010, Prague, Czech Republic. Paris: IAF, 2010: 10475-10485.
- [10] Musci R, Schildknecht T, Beutler G, et al. Observations of high altitude objects from multiple sites[C]//57th International Astronautical Congress, October 2-6, 2006, Valencia, Spain. Reston: AIAA, 2006.
- [11] Utzmann J, Wagner A, Blanchet G, et al. Architectural design for a European SST system[C]//6th European Conference on Space Debris, April 22-25, 2013, Darmstadt, Germany. Paris: European Space Agency, 2013.
- [12] Mokhnatkin A, Molotov I, Tijerina E G P, et al. Implementing of the ISON project in Northern Mexico[J]. Open Astronomy, 2018, 27(1): 167-174.
- [13] Hinze A, Fiedler H, Schildknecht T. Requirements for observation scenarios to maintain a catalogue of space debris objects in geosynchronous region[C]//Proceedings of 7th European Conference on Space Debris, April 18-21, 2017, Darmstadt, Germany. Paris: European Space Agency, 2017.

- [14] Cordelli E, Vananti A, Schildknecht T. Covariance study to evaluate the influence of optical follow-up strategies on estimated orbital parameters[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 122: 76-89.
- [15] Silha J, Schildknecht T, Hinze A, et al. An optical survey for space debris on highly eccentric and inclined MEO orbits[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(1): 181-192.
- [16] Butkus A, Roe K, Mitchell B, et al. Space surveillance network and analysis model (SSNAM) performance improvements[C]//2007 DoD High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference, June 18-21, 2007, Pittsburgh, PA, USA. New York: IEEE, 2007: 469-473.
- [17] Jarvis K S, Africano J L, Sydney P F, et al. Observations of the geosynchronous Earth orbital debris environment using NASA's CCD Debris Telescope[C]//Proceedings of the Third European Conference on Space Debris, March 19-21, 2001, Darmstadt, Germany. Paris: European Space Agency, 2001: 95-99.
- [18] Mulrooney M, Hickson P, Stansbery E, et al. Orbital debris detection and tracking strategies for the NASA/AFRL meter class autonomous telescope (MCATA) [C] // 61st International Astronautical Congress, September 27-October 1, 2010, Prague, Czech Republic. Washington, DC: NASA, 2010.
- [19] Vananti A, Schildknecht T, Pinna G M, et al. Assessment of possible observation strategy in LEO regime[C]//Proceedings of 64th International Astronautical Congress, September 23-27, 2013, Beijing, China. Paris: IAF, 2013: 2363-2372.
- [20] Yanagisawa T, Kurosaki H, Oda H, et al. Ground-based optical observation system for LEO objects[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(3): 414-420.
- [21] Zhang J H, Fan R Y, Zhao N, et al. Electro-optic system detection ability to space-object in strong background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 212-216.
张己化, 范如玉, 赵宁, 等. 强背景下光电系统空间目标探测能力[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 212-216.
- [22] Tan B T, Chen H B, Wang Q S, et al. Evaluation on detecting ability of electro-optical systems to space targets[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 011013.
谭碧涛, 陈洪斌, 王群书, 等. 光电系统对空间目标探测能力综合评估方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1): 011013.
- [23] Hu J J, Liu J, Cui S X, et al. Evaluation model of detected ability for ground-based electro-optic telescope to space debris[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(10): 1012002.
胡静静, 刘静, 崔双星, 等. 地基光电望远镜对空间碎片探测能力的评估模型 [J]. *光子学报*, 2016, 45(10): 1012002.
- [24] Hu J J, Liu J, Cui S X, et al. Analysis of the detection ability for the GEO region of the ground-based electro-optic telescope[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2017, 14(1): 39-44.
胡静静, 刘静, 崔双星, 等. 地基光电望远镜对 GEO 空间碎片探测能力分析[J]. *天文研究与技术*, 2017, 14(1): 39-44.
- [25] Yang B, Li Y C, Zhang T H. Application of camera array in initial orbit determination of space targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0204002.
杨彪, 李迎春, 张廷华. 相机阵列在空间目标初轨确定中的应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0204002.