

空间碎片检测技术研究进展

陶江^{1†}, 曹云峰^{1*†}, 丁萌²

¹南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 211106;

²南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106

摘要 随着空间发射活动的愈加频繁,空间碎片数量急剧增长,严重威胁在轨运行航天器的安全。空间碎片检测是建立空间碎片环境模型的基础,是空间碎片碰撞规避机动的前提,是空间碎片清除任务的先决条件,因此空间碎片检测对维护空间活动安全和空间的可持续性利用具有重要意义。首先综述了现有的地基、天基空间碎片探测系统,对它们的关键问题进行了分析;总结了基于光学、雷达、激光等探测设备的空间碎片检测技术,并对其中的难点和关键技术进行了介绍;最后探讨了空间碎片检测技术的发展趋势。

关键词 检测; 空间碎片; 图像检测; 雷达探测; 激光探测

中图分类号 V476

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415010

Progress of Space Debris Detection Technology

Tao Jiang^{1†}, Cao Yunfeng^{1*†}, Ding Meng²

¹College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China;

²College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China

Abstract With the more frequent space launch activities, amount of space debris increase rapidly, which pose a heavy threat to the in-orbit functional spacecraft. Space debris detection is the basis of space debris environment modelling, active debris removal, and collision avoidance maneuver. Therefore, space debris detection plays an important role to maintain the space safety and space sustainability. First, the existed ground-based and space-based space debris detection systems are reviewed, and corresponding key technologies are analyzed. Second, the space debris detection technologies based on optical sensors, radar, and impact detectors are reviewed, respectively, the corresponding difficulties and key technologies are also introduced. At last, the future development trend of space debris detection is discussed.

Key words detection; space debris; image-based detection; radar-based detection; laser-based detection

1 引言

空间碎片是指所有在轨运行或者重返地球大气稠密层的失效的人造物体,主要包括发射活动和在轨操作过程中所产生的火箭箭体、任务碎片、失效航天器和解体碎片^[1]。失效航天器、火箭箭体等大尺寸空间碎片与在轨运行航天器的碰撞可造成爆炸、破裂、结构解体等毁灭性损害;厘米级的空间碎片也可能导致航天器彻底损坏;而毫米级空间碎片可能造成航天器表面穿孔或成坑、天线变形、压力容器或密封舱泄漏;微米级空间碎片

累积撞击效应可导致航天器表面砂蚀、光敏或热敏等器件功能下降甚至失效。为此,世界各国制定了多项空间碎片探测战略计划,建设了广泛的空间碎片监视系统网络,深入研究了空间碎片检测技术,以实现空间碎片的防护、减缓、治理和规避。我国国务院于2022年1月28日发布的《2021中国的航天》白皮书中明确指出:未来五年,建设完善空间碎片监测设施体系、编目数据库和预警服务系统,统筹做好航天器在轨维护、碰撞规避控制、空间碎片减缓等工作,将空间碎片清除等新技术验证作为我国未来五年航天工业的关键技术攻关任务

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-05-10; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室开放课题(NJ2020021-01)、南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ19-11)

通信作者: *cyfac@nuaa.edu.cn

† 共同第一作者

之一^[2]。因此,空间碎片检测技术对空间态势感知、空间环境治理、空间安全都具有重要的应用价值。

为实现空间碎片检测,世界各国和地区建立了广泛的空间目标探测系统,其中美国的空间监视网络(SSN)是目前世界上技术最为先进和完善的空间目标探测系统,具有空间目标监视和导弹预警的多探测用途、被动探测和主动探索互补的探测手段、地基探测和天基探测互补的探测平台、遍布全球的控制操作中心。截止到2022年2月,美国SSN已编目包括空间碎片在内的空间目标数量超过2.5万^[3]。俄罗斯是除美国外唯一拥有专用空间目标探测系统的国家,其地基空间目标探测系统和国际科学光学网络(ISON)共同构成了俄罗斯空间目标探测系统^[4]。其他如加拿大、法国、意大利、英国、德国等也都构建了自己的空间目标探测系统,但在布局和协同观测方面缺乏系统规划,无法构成空间目标探测网络,导致对空间目标探测的覆盖范围受限。为此,欧洲于2006年提出了欧洲空间监视系统(ESSS)的概念,但后续计划尚不明确^[5]。我国的空间目标探测系统主要依赖地基设备,且地基观测站点主要分布我国境内,使得对空间目标的探测时间和空间覆盖范围有限。2011年,我国与亚太空间合作组织(APSCO)合作,正式成立了亚太地基光学空间物体观测系统(APOSOS)项目,旨在建立一个区域性乃至全球性的光学卫星观测网络,实现对空间目标的捕获、跟踪与测量,为航天器的发射与在轨运行提供安全保障^[6]。目前由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的首批地基空间碎片光电观测望远镜已完成在巴基斯坦、秘鲁和伊朗的观测站点部署。

综上,当前的空间碎片探测系统由地基探测网络和天基探测系统共同构成,其中地基探测网络趋于全球分布态势,以扩展空间覆盖范围。天基空间碎片探测系统作为地基空间碎片探测网络的有力补充,是未来主要的发展方向。空间碎片探测系统的性能评价指标除空间覆盖范围外,还包括观测的空间碎片数量、持续观测的空间碎片数量和探测精度等。空间碎片探测性能的提升依赖于软硬件技术的共同发展,主要包括空间碎片探测系统的部署数量和分布位置、探测系统性能参数、观测策略、检测技术、轨道预报模型等。本文从部署优化和探测系统性能参数的角度分别介绍了国外和国内的地基、天基空间碎片探测系统的最新发展动态;根据探测系统的不同传感器类型,从检测技术的角度分别综述了基于光学的空间碎片检测技术、基于激光测距的空间碎片探测技术和基于碰撞探测器的空间碎片检测技术;对空间碎片检测技术的未来发展趋势提出建议。

2 国内外空间碎片探测系统

2.1 地基探测系统

地基探测系统面临的关键问题包括观测站点部署

位置和设备配置优化问题、探测系统性能的提升问题^[7]。由于空间碎片探测传感器的数量有限,探测能力不同,如何布设传感器网络实现最优或次优的探测性能是一个关键问题。目前主要通过理论分析结合仿真以及实测数据分析来对观测站点部署位置和设备配置进行优化。而各国对于各自空间监视网的部署情况和探测能力都采取高度保密策略,目前只有美国有相关公开文献。美国研制了测站位置变动、设备增减、设备性能变化等对空间监视网能力影响的软件,包括空间监视网络和分析模型(SSNAM)和空间监视性能分析工具(SSPAT)。这些软件通过数据中心定期收集的增减站点、设备性能的运行和故障、各站点的数据贡献等历史数据来评估单个装备性能、部署位置等因素的变化对整个监测网的影响^[8]。我国武汉大学的杜建丽^[9]研制了“空间态势感知仿真系统”平台,该平台通过构建虚拟的空间监测装备体系,实现了对空间监测网的灵活定制;通过设置传感器的数量、分布、配置(例如光学传感器的极限探测星等、视场大小等)实现了对装备体系的效能评估,实现了基于规则推理法的装备贡献度评估等重要功能。北京理工大学的李曦^[10]开发了空间监视网性能评估软件,该软件可对观测计划、观测数据、编目定轨结果、设备工作状态等信息进行综合管理,对监视中心下达的任务计划数据进行汇总和分析,最后实现集中性、频次等性能指标评价。东南大学的冯楠^[11]开发了空间目标资源调配系统,该系统通过对各中心探测系统属性和部署位置、空间目标运行轨迹的分析,计算探测弧段,通过权重排序的方法得到最优资源调配方案,最终实现统一调配多个单位的探测系统,以协同完成探测与编目任务,提高资源利用率。由上可知,当前对观测站点部署和设备配置优化过程中,各监测设备独立工作,综合能力的叠加不能充分发挥系统的最大性能。未来应考虑探测系统间的协同工作模式,主要以扩充探测目标数量、提高探测精度为设计原则,同时优化观测站点位置、设备参数和工作模式。

根据不同的传感器类型,地基空间碎片探测系统主要分为地基光学望远镜系统、地基雷达系统、地基激光测距站系统三类。由于需要穿透大气才能观测到空间碎片,因此地基探测设备的探测性能受地球大气衰减特性影响。对于地基光学望远镜,其衰减因子为 $1/\rho^2$,对于地基雷达探测设备,其衰减因子为 $1/\rho^4$,其中 ρ 表示探测设备探测到的空间碎片最小斜距^[12]。故地基光学望远镜主要用于探测低轨小尺寸目标和高轨微弱目标,地基雷达主要用于探测低轨空间大尺寸目标。地基空间碎片探测主要包括搜索发现和跟踪测量两个步骤,而搜索发现是通过较小的瞬时视场来实现对整个空域的扫描探测的,因而搜索更新速率慢,无法满足对新目标、动态目标快速发现和多个目标同时观测的需求。解决上述问题的思路一是通过对多探测系统

进行组网实现协同探测,二是提升单个探测系统的探测性能。如美国的 SSN 实现了遍布全球的 30 个地基雷达和地基光学望远镜组网探测,探测范围可覆盖低轨到高轨,对中低轨 10 cm 以上的空间目标分辨率达 5 cm,每 24 h 的定轨精度达 1 km,对高轨 30 cm 以上的空间目标分辨率可达 50 cm,每 24 h 的定轨精度可达 3 km^[13]。俄罗斯的 ISON 实现了全球 10 个国家的 30 台地基望远镜组网探测,另外俄罗斯的“窗口”光电探测系统由 10 台地基光电望远镜构成,可覆盖 120~40000 km 轨道高度^[14]。我国参与的 APOSOS 目前已在 3 个国家共完成 3 台地基望远镜的部署^[15]。此外,中国极地研究中心的杨臣威等^[16]分析了在我国南极昆仑站开展的空间碎片探测的效能,论证了相较于中低纬度,南极具有低轨空间碎片过境频次高、可观测时间长、极昼期间也可监测大尺寸空间碎片的优势。单个探测传感器虽无法像空间目标监视网络一样实现大范围覆盖探测,但可用于对某个轨道区域的观测或某个特定空间目标的跟踪监视,所获取的数据除常规的编

目外,也可用于改善现有的空间环境模型的精度,其探测性能也关系到空间目标探测网络的整体性能。

针对地基光学空间碎片探测系统性能提升问题,目前主要从光学望远镜的口径和视场角两个设备性能指标着手。由于低轨空间目标相对于地基光学望远镜运动速度快,因此需要大视场望远镜进行探测;而高轨空间目标和地基光学望远镜运动速度慢,且目标具有暗弱特性,需要大口径小视场望远镜进行探测。典型的用于探测高轨空间碎片的地基光学望远镜有美国航天局(NASA)的密歇根轨道碎片调查望远镜(MODEST)^[17]、欧空局(ESA)的空间碎片望远镜(SDT)^[18]、瑞士伯尔尼大学天文研究所(AIUB)的激光和天体测量望远镜(ZIMLAT)^[19];典型的用于探测低轨空间碎片的光学望远镜有捷克夸美纽斯大学(FMPI)的天文地球物理天文望远镜(AGO)^[20]、我国的 APOSOS 望远镜^[15]。图 1(a)为 ESA 的 SDT,图 1(b)为 NASA 的 MODEST,图 1(c)为 AIUB 的 ZIMLAT,图 1(d)为 FMPI 的 AGO70^[21]。

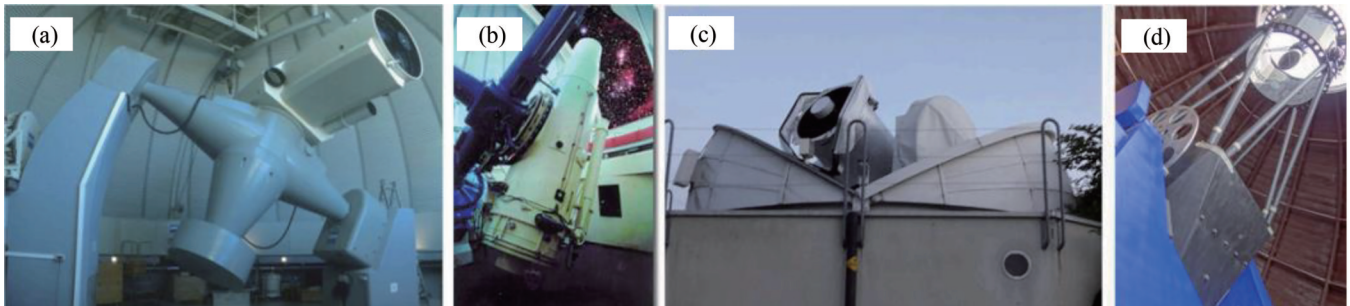


图 1 典型地基光学望远镜空间碎片探测系统^[21]。(a) SDT;(b) MODEST;(c) ZIMLAT;(d) AGO70

Fig. 1 Typical ground-based optical telescope systems for space debris detection^[21]. (a) SDT; (b) MODEST; (c) ZIMLAT; (d) AGO70

表 1 为典型的用于空间碎片探测的地基光学望远镜系统的主要参数^[21]。SDT 主要用于检测和跟踪地球同步轨道(36000 km)的空间碎片,碎片大小为 10~15 cm,可探测星等为 +19 到 +21。MODEST 同样用于对地球同步轨道空间目标的探测,可实现对直径小于 20 cm 的空间碎片的探测。ZIMLAT 是激光测距站

(SLR)和光学望远镜组成的混合地基空间探测系统,用于对地球同步轨道小尺寸空间碎片的探测,SLR 主要用于探测合作目标,光学望远镜用于探测空间碎片和近地天体的位置和星等。APOSOS 可实现对低轨 10 cm 空间碎片的跟踪和中高轨米级空间碎片的跟踪。

表 1 典型的用于空间碎片探测的地基光学望远镜系统的主要参数^[21]

Table 1 Key parameters of typical ground-based optical telescope system for space debris detection^[21]

Telescope	Mount	Camera	Size /(pixel×pixel)	Mirror size /m	FOV /[(′)×(′)]
ESA SDT	Equatorial	CCD	4096×4096	1.00	42.0×42.0
NASA MODEST	Equatorial	CCD	2048×2048	0.61	78.0×78.0
AIUB ZIMLAT	Alt-azimuth	CCD/sCMOS	2048×2064	1.00	25.0×25.0
FMPI AGO70	Equatorial	CCD	1024×1024	0.70	28.5×28.5
APOSOS	Equatorial	sCMOS	2000×2000	0.15	168.0×168.0

基于雷达的空间碎片探测系统关键技术主要包括超宽带成像雷达探测技术、低信噪比碎片雷达探测技术等。对于地基雷达探测系统,由于地理位置分布不均,可探测的空间范围存在盲区。随着未来空间任务趋于精细化感知,也对空间碎片高分辨率雷达成像提

出了要求。美国 2013 年将 Haystack 雷达升级改造为超宽带卫星成像雷达(HUSIR),使其成为目前世界上成像分辨率最高的空间目标探测雷达,可在 1000 km 距离探测大小为 1 cm 的空间碎片^[22]。由于探测毫米级空间碎片的雷达横截面积较小,需要较大尺寸的发

射功率和雷达天线才能实现对低信噪比目标的探测。因此,如何提高地基雷达探测信噪比是一个关键问题。目前主要的解决思路是通过积累脉冲相干、降低雷达距离分辨率、借助合成孔径雷达成像探测等方法提高小尺寸空间碎片信噪比^[23-25]。如德国的 TIRA 雷达探测系统是碟形天线的脉冲精密跟踪雷达,包含一个工作频段为 L 波段(中心频率为 1.333 GHz)的跟踪雷达和一个工作在 Ku 波段的高分辨率成像雷达,它每次只能跟踪一个目标,可以实现高分辨的 ISAR 成像,用于分析目标的在轨状态、形状大小等。法国 GRAVES 雷达为双站单频点连续波体制雷达,工作频段为 VHF 波段(中心频率为 143 MHz),主要用来实现对轨道高度低于 1000 km 的 LEO 空间目标的监测。美国“太空篱笆”系统采用的雷达为单基脉冲体制有源相控阵雷达,可实现的最大探测高度为 40000 km,对距离为 11000 km、散射截面(RCS)为 1 m²的空间目标的检测概率为 90% 以上,虚警概率为 1×10⁻⁶。图 2 为美国“太空篱笆”探测系统中雷达部署位置,第一个雷达探测系统 sensor site 1 位于马绍尔群岛夸贾林环礁(Kwajalein Atoll),第二个雷达探测系统位于澳大利亚的西澳大利亚州(Western Australia)^[26]。我国专用于空间目标探测的地基雷达探测系统目前还处于论证阶段,中国科学院、中国电子科技集团、南京电子技术研究所、国防科学技术大学、北京跟踪与通信技术研究所等单位相关领域的专家学者为构建我国的空间目标探测系统做出了大量论证和建设性工作,提出了一种低成本高效能的具有双搜索屏体制的普测雷达系统^[27]。

地基激光测距站的探测性能提升主要依靠高稳

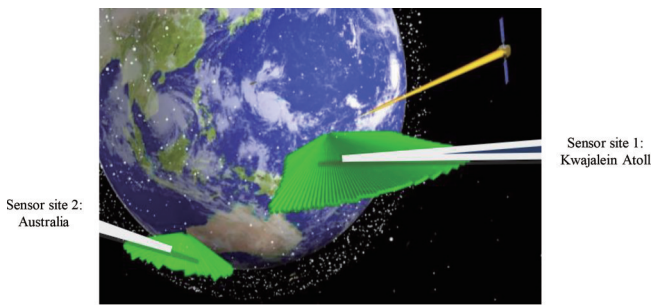


图 2 “太空篱笆”系统中雷达部署位置^[26]

Fig. 2 Radar deployment location in Space Fence system^[26]

定的跟踪系统和近红外波长激光测距技术。实际测量中,跟踪系统总存在一定的跟踪误差,在发射激光击中目标的情况下,其接收到的激光回波数比无跟踪误差时要少。因此,激光发散角一定时,望远镜跟踪误差越小,越有利于激光回波探测。由于 532 nm 波长属于可见光波段,便于光学系统调试、光束指向监视和目标精确瞄准,国际上的卫星激光测距站普遍采用该波长的激光测距。然而基于倍频器件产生的 532 nm 激光会损失 50% 的能量,若提高激光器输出功率,会对倍频器的稳定性和寿命造成损害,同时也限制了其对空间目标的探测性能。而采用基频 1064 nm 波长的激光可避免倍频问题,同时相较于 532 nm 波长的激光,大气透过率更优,回波更强,可有效增加观测弧长,因此应用于空间碎片探测时十分有助于提升系统性能。但 1064 nm 波段存在满足高精度的单光子探测器噪声较大、靶面较小、对光学系统的准直等要求高等难点,发展较为缓慢。2017 年,法国 Grasse 激光测距站^[28]通过激光测月证明了 1064 nm 波长相较于可见光波长在空间背景噪声上的优势。2020 年,我国上海天文台^[29-30]利用 1064 nm 波长的激光在国内首次实现了对厘米级合作目标的测距试验验证。其他典型的地基空间碎片激光测距站有美国西班牙的 Yebes (532 nm) 激光测距站(YLARA)、欧空局 IZN-1 激光测距站(532 nm/1064 nm)、我国的云南天文台^[31](532 nm/1064 nm)、中科院国家天文台长春人造卫星观测站(532 nm),它们也都成功进行了空间碎片测距实验。

IZN-1 是目前世界上最先进的空间碎片激光测距设备之一,于 2021 年安装在西班牙泰德天文台,并在 2022 年 2 月由欧空局的欧洲空间操作中心(EESOC)启用。IZN-1 的主要任务目标是检测空间碎片和卫星相对于测距站的距离、速度和轨道,距离测量可达毫米级精度,用于跟踪卫星的激光发射功率为 150 mW,用于跟踪小尺寸空间碎片的发射功率为 50 W,检测得到的空间目标结果可用于空间碎片规避、空间交通控制、空地激光通信等技术。IZN-1 系统构成^[32]主要包括:图 3(a)的望远镜激光发射系统和图 3(b)的探测系统。望远镜激光发射系统主要包括两个发射单元,可分别用于发射波长为 532 nm 和 1064 nm 的激光,其中

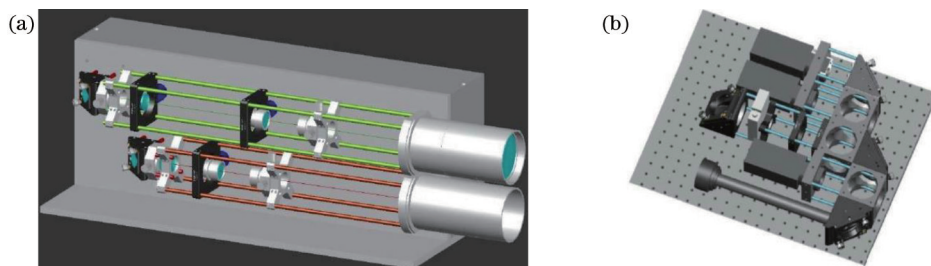


图 3 IZN-1 激光测距系统构成^[32]。(a)望远镜激光发射系统;(b)探测系统

Fig. 3 Components of IZN-1 laser ranging system^[32]. (a) Laser package with transmit telescope; (b) detector package

1064 nm 波长的激光用于夜晚观测,两种波长都可用于白天观测。探测系统主要包括激光探测器、光变曲线探测器、空间碎片跟踪相机。对于空间碎片轨迹检测,拟采取条纹检测的方法^[33],当观测到 3 条以上的条纹轨迹时就可以用于确定目标的轨道信息,然后加入到编目数据库中;对于空间碎片光变曲线特性检测,拟采取相图重建的方法从检测到的光变曲线得到空间碎片的旋转周期^[34];对于空间碎片跟踪,拟采取多站跟踪模式^[35]以实现高精度定轨,只要采集两次条纹激光测距数据就可极大改善两行轨道根数(TLE)的精度。由上可知,随着空间碎片激光探测技术的发展和微弱空间碎片探测要求的提高,多站协同跟踪技术和近红外波长激光测距技术成为发展趋势。相比 532 nm 波长激光信号,1064 nm 波长激光信号在激光输出功率、大气传输、目标观测隐蔽性等方面具有较好的技术优势,是开展小尺寸空间碎片激光观测的重要方面。

2.2 天基探测系统

天基空间碎片探测传感器可分为天基光学传感器、天基碰撞探测器、天基雷达三种类型。和地基探测系统相比,天基空间碎片探测系统具有不受部署位置约束、不受地球大气衰减特性影响、探测时效性高的特点,是地基探测系统的扩展与补充,可有效提升对空间碎片监测的覆盖性、时效性和编目精度。为提高对空间碎片探测的覆盖面积,天基探测系统同样呈多平台、集群协同观测态势。如美国的天基空间监视系统(SBSS)是由 4 颗卫星构成的星座^[36]、美国的地球同步轨道空间态势感知计划(GSSAP)是由 6 颗卫星构成的星座、欧洲空间监视系统(ESSS)和加拿大的 Skylark 是由 3 颗卫星构成的卫星星座^[37-38]等。基于多平台的天基空间碎片探测系统涉及的关键技术主要包括星座部署优化技术、观测策略等。

SBSS 是美国太空军计划在近地轨道(LEO)部署的天基空间目标监视卫星星座,用于提高美国国防部对空间目标(包括空间碎片、在轨运行航天器)检测和跟踪的能力。SBSS 的星座部署方案和观测地球同步轨道(GEO)目标的策略如图 4 所示^[39]。该星座由 4 颗卫星构成,其中两个卫星部署在相位相差 180°的同一轨道面上,分别用于观测 GEO 环上赤经为 +15°和 -15°的赤纬条带;第三个卫星用于观测 ±38.5°赤经位置中的一个条带;最后一个卫星作为第三个卫星的补充,用于响应地面部分对目标的主动跟踪请求。定义了 GEO 环的宽度为 -18°~+18°,由于卫星携带的光学传感器视场角为 3.8°×3.8°,为了尽可能观测 GEO 环上的所有目标,将每个赤纬条带划分为 9 个区域,传感器每分钟观测一个区域,这样就能观测到整个赤纬条带上的目标。

目前 SBSS 只发射了一颗卫星,用于对 GEO 目标进行监视和编目,具体探测流程如图 5 所示。首先由

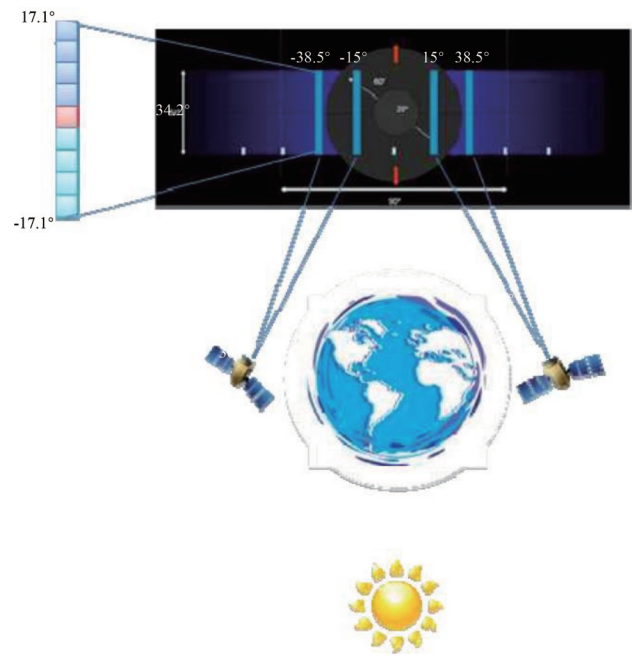


图 4 SBSS 卫星星座观测策略^[39]

Fig. 4 Observation strategy of SBSS constellation^[39]

卫星携带的可见光传感器获取空间目标光学图像序列信息,然后由星载处理器进行在轨目标检测与跟踪,接着将检测到的目标位置信息发到地面处理中心进行精确轨道确定,最后根据轨道预报进行碰撞风险分析和预警^[40]。卫星对序列图像的跟踪模式为恒星跟踪模式,此时恒星在图像中为点源目标,而空间目标为条纹目标,依据二者之间的图像特性差异,星载处理器采取阈值分割等图像处理算法检测出空间目标,并根据卫星的位置信息估计出空间目标的位置。

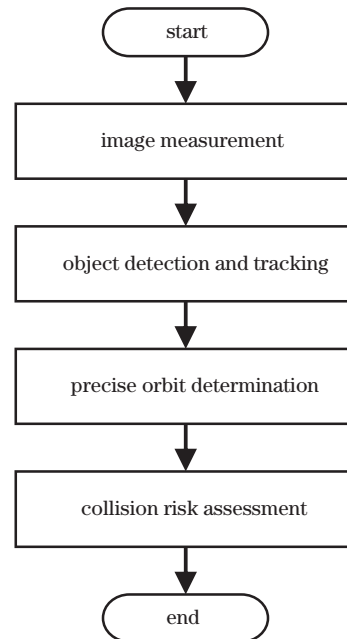


图 5 SBSS 的空间目标检测流程

Fig. 5 Flow chart of space object detection of SBSS

天基雷达相较于天基光学探测器具有不受光照条件约束的优点,但由于发射质量和天基平台载荷有限,目前的天基雷达探测设备多为小功率雷达,因此限制了探测距离和可探测的空间碎片尺寸大小。对于天基雷达探测系统,如何在高速运动的状态中实现前进方向半球空间区域探测的全覆盖是一个关键问题,例如可设计多波束宽覆盖的天线,同时应避免天线过于复杂。为充分有效地实现在轨探测,根据空间碎片的威胁等级确定雷达探测的方向序列也是一个关键问题。典型的天基雷达空间碎片探测系统有美国在国际空间站上搭载的空间碎片监视雷达、法国空间研究中心在小型卫星星座搭载的微波雷达、俄罗斯的毫米波(MMW)相控阵雷达、加拿大的空间碎片观测雷达^[41]。此外还有激光雷达(LiDAR)可用于空间碎片捕获交会过程中的近距离检测,如英国萨里空间中心 RemoveDEBRIS 任务于 2018 年进行了空间碎片主动清除技术的在轨演示试验,验证了 1 km 范围内的 3D Flash LiDAR 的成像探测性能^[42]。图 6 为 RemoveDEBRIS 任务中所采用的 LiDAR,图 6(a)为 LiDAR 的结构图,图 6(b)为 LiDAR 对失效卫星的成像图。

天基碰撞探测器是目前探测微小空间碎片(毫米级及以下)的主要途径,但只能用于探测固定轨道区域的空间碎片,无法实现广域探测。通过空间碎片撞击到探测器表面产生的电信号来分析计算碎片的质量、速度、通量等信息,并根据这些信息建立小碎片的轨道

统计分布模型,可为探测器防护结构设计和碰撞规避提供依据。基于碰撞的探测器又可分为压电探测器、电离探测器、半导体探测器、组合式探测器。美国航天局 NASA 研制的空间碎片传感器(SDS)^[43]属于电阻格栅(RGs)和压电探测器结合的组合碰撞探测器^[44],通过 Debris Resistive/Acoustic Grid Orbital NASA-Navy Sensor(DRAGONS)传感器,探测 50 μm 以上、毫米级以下微小空间碎片的尺寸、速度、方向和密度。SDS 于 2017 年 12 月发射,2018 年 1 月被安装在国际空间站的哥伦布舱外,运行 26 天后出现故障,期间共记录了超过 1200 份撞击事件,但只记录了撞击时间和撞击位置。DRAGONS 的基本构成如图 7(a)所示,图 7(b)为空间碎片撞击 DRAGONS 的示意图^[45]。

如图 7(a)所示,DRAGONS 由两层薄膜和一层挡板组成。两个薄膜之间相隔 15 cm,薄膜厚度为 25 μm,蓝色方块表示声波传感器,在第一层薄膜上铺设宽度为 75 μm 的电阻丝。如果空间碎片的尺寸大于薄膜的厚度且大于电阻丝的宽度,当其高速撞击到第一层薄膜就会切断一根或多根电阻丝,然后到达第二层薄膜,接着继续穿越第二层薄膜最后撞击到挡板上。空间碎片在第一层薄膜的撞击位置可以通过四个声波传感器测量的到达时间结合三角测量算法得到^[46]。然后再结合第二层薄膜上的撞击时间和位置数据,就可以得到空间碎片的撞击速度和方向。通过空间碎片撞击切断电阻丝,阻值增加,可以用来判断被切断电阻丝的数量,以此来表征电阻丝被破坏的区域大

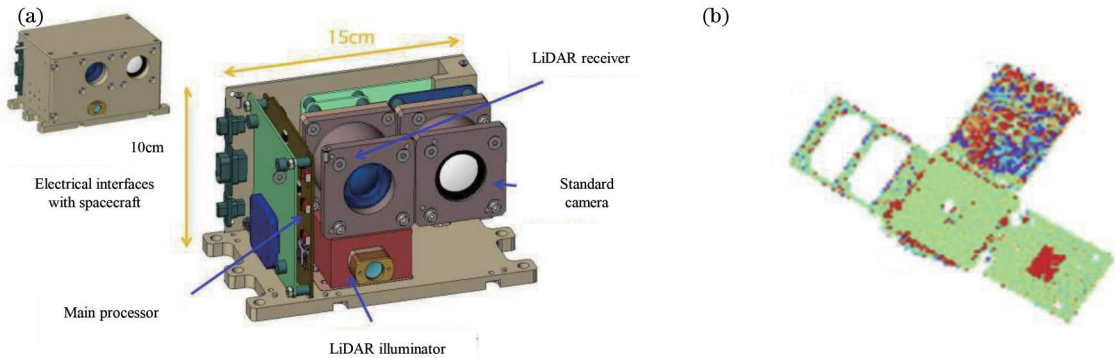


图 6 RemoveDEBRIS 任务中的 LiDAR^[42]。(a) LiDAR 结构图; (b) LiDAR 成像图
Fig. 6 LiDAR in RemoveDEBRIS mission^[42]. (a) Structure of LiDAR; (b) image obtained by LiDAR

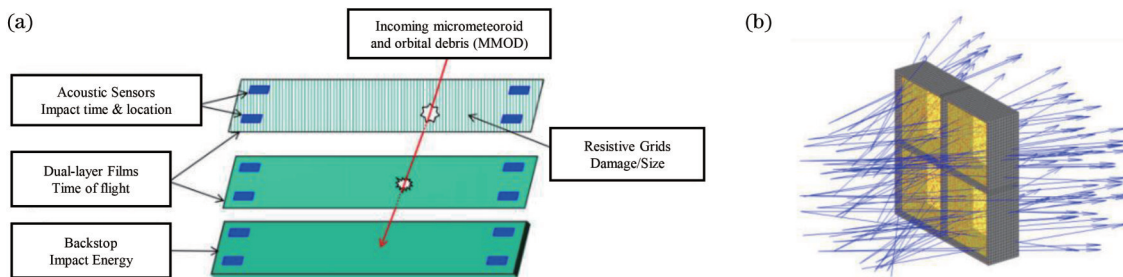


图 7 DRAGONS 结构及撞击示意图^[45]。(a) DRAGONS 结构; (b) 撞击示意图
Fig. 7 Structure of DRAGONS and diagram of impact^[45]. (a) Structure of DRAGONS; (b) diagram of impact

小,再根据地面试验测得的破坏区域大小一般比撞击粒子大 5%~10% 的经验来计算空间碎片的大小。而第三层挡板上的声波传感器接收到的声波信号可以用来估计空间碎片的撞击动能,于是就可计算出空间碎片的密度。

目前我国的的天基空间碎片探测系统还处于初步建设阶段。典型的天基光学探测系统有长光卫星技术有限公司研制的“吉林一号”遥感卫星星座。解延浩等^[47]利用“吉林一号”卫星星座进行了多次对惯性空间目标的成像,验证了“吉林一号”视频卫星用于天基观测的可行性,还开展了空间目标交汇预测与视频星成像窗口搜索、对典型低轨目标的覆盖能力、基于多帧图像的点目标提取等方面的研究,标志着“吉林一号”视频卫星已具有较完整的对空间目标观测成像的能力。此外,我国的嫦娥一号探测卫星可检测超过 1500 个空间目标,神舟七号也具备空间碎片探测和定轨能力。我国的天基雷达空间碎片探测系统和天基碰撞空间碎片探测器还处于理论研究阶段。如中国科学院电子学研究所李道京等^[48]分析了空间站载天基毫米波雷达系统参数对空间碎片轨道预测精度的影响,同时对天基毫

米波雷达系统的测距、测角、测速性能进行了分析。综上所述,我国的空间碎片探测系统还不完善,与国际空间碎片探测系统水平存在较大差距。目前我国的空间碎片探测主要依赖于地基探测设备,且专用于空间目标探测的设备数量较少。空间探测网络还处于初步建设阶段,在全球的观测站点分布较少,对空域覆盖范围有限;天基空间碎片探测系统也较为单一,未形成专项的国家战略规划。因此,加快构建我国的空间目标探测系统,形成一定规模的空间目标探测网络是我国未来空间探测领域的重要工作。

3 空间碎片检测关键技术

3.1 基于光学图像的空间碎片检测技术

图 8 为基于光学图像的空间碎片目标检测一般流程^[49],主要包括图像填充、背景去噪、二值化处理、目标确认、特征提取和识别、测光操作、星等计算、空间碎片的质心计算、坐标转换、空间碎片关联等操作,最终输出空间碎片的来源、位置、大小等信息。对未关联成功的空间碎片则执行轨道确定操作,以实现空间碎片编目。

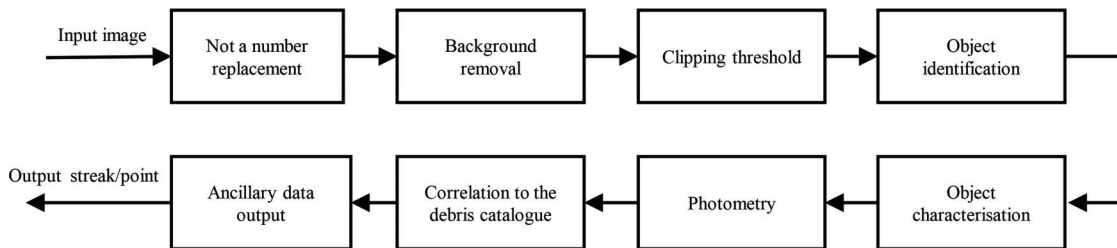


图 8 基于光学图像的空间目标检测流程^[49]

Fig. 8 Spatial target detection process based on optical image^[49]

根据不同的观测模式,基于光学图像的空间碎片检测技术主要包括条纹目标检测技术和点状目标检测技术。当光学观测平台处于恒星跟踪模式时,此时光学传感器相对于背景恒星目标静止,所观测的图像中运动的空间碎片会呈现出条纹状的轨迹,而背景恒星目标为点状目标;当光学观测平台为目标跟踪模式时,光学传感器相对于空间碎片目标静止,而背景恒星显示出条纹状运动轨迹。图 9(a)为条纹空间碎片目标,图 9(b)为点状空间目标^[50]。

从上述空间碎片检测流程和观测模式可知,基于光学图像的空间碎片检测技术主要面临 3 个难点。1) 观测图像存在大量噪声。空间碎片背景图像的噪声主要来源于两个方面,一是传感器本身的系统噪声,如热噪声、暗电流噪声、散粒噪声等;二是地、月等天体的漫反射引发传感器偶然扰动而产生的杂散光噪声^[51]。而在追踪观测模式下,空间碎片目标同样为类似于噪声的点状目标,可能会被噪声淹没。同时杂散光也会改变图像对比度,甚至覆盖空间目标。2) 动态目标、动态场景。无论是地基探测设备还是天基探测设备,当

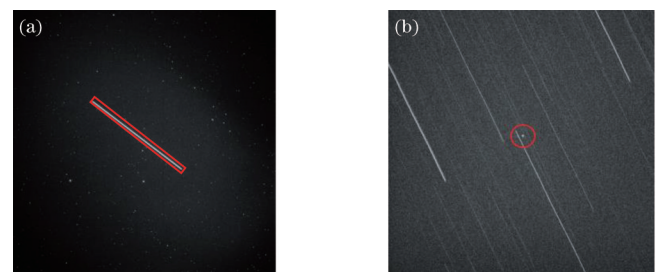


图 9 不同观测模式下的空间碎片目标形状^[50]。(a) 条纹目标; (b) 点状目标

Fig. 9 Space debris shape in different surveillance modes^[50].

(a) Streak-like object; (b) point-like object

观测模式为恒星跟踪模式时,空间碎片和探测系统处于相对运动状态;当观测模式为目标跟踪模式时,探测系统和空间背景处于相对运动状态。因此,如何实现动态环境下的空间碎片精确检测是一个难点。3) 弱小特征目标。当观测远距离空间碎片时,空间碎片在光学图像上尺寸小、无明显几何特征、亮度低,因此如何提取弱小空间碎片目标特征、实现空间碎片低虚警率

探测是关键问题。综上,基于光学图像的空间碎片检测可以归结为低信噪比下的运动目标检测问题。对这类问题一般有两种思路:检测后跟踪(DBT)和检测前跟踪(TBD)。DBT是基于单帧图像进行目标检测的方式,TBD是利用帧间运动信息进行目标检测的方式,当信噪比低时,TBD比DBT检测性能好,因此目前大多采用TBD方法检测空间目标。典型的TBD方法包括多假设跟踪(MHT)算法和基于动态规划的算法。此外,澳大利亚阿德莱德大学的Do等^[52]提出了Gaussian process regression-iterative closest point(GP-ICP)算法,该算法对地球同步轨道空间目标的召回率和准确率可达90%以上。

3.2 基于雷达的空间碎片检测技术

基于雷达的空间碎片探测主要包括信号检测和参数估计两个步骤。而处于雷达系统检测极限尺寸附近的目標或者由于空间目标雷达散射截面积(RCS)的快速起伏引起的弱信号的检测和参数估计问题是基于雷达的空间碎片检测的难点。目前的主要解决思路是通过目标回波信号的最优滤波和相参积累来实现最大的累积信噪比输出。由于低轨空间碎片相对于雷达探测系统运行速度很快,可观测时间较短,特别是对于篱笆型这种具有普测潜力的雷达体制,其监测空域在东西方向很宽,南北方向很窄,目标穿越其南北方向视场的时间更加短暂,使得信号可积累时间愈加减少^[27]。而且空间目标相对于雷达探测系统并非匀速运动,相参积累和参数估计性能会受到加速度甚至加加速度的影响。目前主要通过广义匹配函数(GMF)和Karhunen-Loève Transform(KLT)来提升弱信号累积效果。如北京交通大学的Zhu等^[53]于2022年提出了基于KLT的连续波雷达弱小目标检测方法,通过数值仿真实验验证了当目标被噪声严重淹没时,该方法仍然具有较高的检测概率。挪威特罗姆瑟大学Vierinen等^[54]利用GMF实现了欧洲非相干散射科学协会(EISCAT)雷达的双倍累计时间。Tromsø雷达检测到了2077个空间目标,其中有68%来自于北美空防司令部(NORAD)空间目标编目库,Svalbard雷达监测到了2400个目标,其中85%来自于NORAD编目库。

3.3 基于激光测距的空间碎片探测技术

基于激光测距的空间碎片检测技术主要依据激光测距方程^[55]测量激光系统和空间碎片之间的距离。

$$n = \frac{\eta}{hv} \frac{E_t A_r \sigma}{4\pi\theta_t^2 R^4} T^2 T_t T_r \alpha, \quad (1)$$

式中: n 为激光测距系统接收到的平均光电子数量; t 为激光发射系统, r 为激光接收系统; h 为普朗克常数; v 为激光频率; E_t 为发射的激光脉冲能量; A_r 为激光接收系统的有效面积; σ 为空间碎片横截面面积; θ_t 为激光发散角; R 为激光测距系统和空间碎片之间的距离; T 表示大气透过率; T_t 表示激光发射系统效率; T_r 表示激光接收系统效率; α 为大气衰减系数。当激光

测距系统接收到的光子数达每秒5个及以上时就认为空间碎片被成功观测到。影响激光测距性能的关键技术主要包括大孔径激光测距望远镜技术、多站激光测距技术、近红外激光测距技术等。

由激光测距原理可知,当系统接收到的回波光电子数越多,测距性能越好。然而被测空间目标表面对入射激光束漫反射,使得返回激光信号弱,导致测量难度大。因此,提升地面站激光发射能力、微弱信号接收探测能力是提升空间碎片激光测距技术的关键,涉及的关键技术包括大孔径望远镜技术和多站协同测距技术。通过增大望远镜孔径,可实现接收更多光子的目的,从而改善对远距离小尺寸空间碎片的测距性能。2006年,澳大利亚Electro Optic Systems公司^[56]研发的激光测距望远镜的孔径为1.8 m,可实现对1000 km处大小为10 cm的空间碎片的测距。2012年,法国Grasse激光测距站^[57]采用了1.56 m孔径的望远镜,可实现对1700 km高度的空间碎片的测距。2021年,我国上海天文台^[58]采用1.8 m孔径的激光测距望远镜首次实现了对6700 km高度的空间碎片测距,可探测的空间碎片RCS为13.6 m²。

除通过增大望远镜孔径接收更多光子数外,还可通过多站望远镜同步接收的方式增大光子有效接收面积,等效于增大望远镜孔径。此外,多站接收模式也和空间碎片这类非合作空间目标所具有的激光返回方向不定、激光束覆盖范围广的特点相契合。2015年,奥地利Graz激光测距站^[59]成功进行了一站发射、三站接收的空间碎片测距试验,对距离为3000 km、RCS为19 m²的空间碎片测距精度最高为15.5 cm。2020年,我国上海天文台^[60]通过两个相隔2.5 km的望远镜实现了距离为千米级的空间碎片激光测距,对于RCS为4.21 m²的空间碎片,激光测距精度最高可达56.2 cm。

4 空间碎片检测技术发展趋势

1) 基于多观测平台的空间碎片协同检测技术。由于传统的基于单星/单站观测平台存在快速响应能力弱、空间覆盖范围小等缺点,目前的空间碎片探测系统正从单一观测平台发展为由多观测站点/多颗卫星构成的组网探测或星座协同探测模式。这种多观测平台协同检测方式具有较强的冗余性、鲁棒性和可重构性,可提高初轨定位精度^[61],对未来复杂的空间态势感知任务适应性好。根据世界各国制定空间碎片探测的战略规划来看,基于多站点协同探测和基于卫星星座等多平台的空间碎片协同检测技术是未来的发展方向。

2) 空间碎片在轨自主检测技术。由于天基探测系统能克服地基探测系统的地域布站限制、大气的消光和散射等缺点,特别适合于对暗弱目标的观测,并且重访频率大大提高。因此,未来天基空间碎片检测技术有更大的发展潜力。同时,当前的空间碎片检测技

术高度依赖地面多部门协调合作,无法及时处理在轨获取的信息并对空间态势做出实时反应,如应急规避空间碎片群和其他航天器等空间目标。因此为了提高在轨航天器自主等级、减少星地控制频次、减轻星地传输带宽压力、降低系统运行成本,对空间碎片的在轨自主检测技术是未来的发展趋势。

3) 空间碎片精细建模与识别技术。虽然目前的地基探测系统和天基探测系统已经实现了厘米级的测距和尺寸测量精度,但在空间碎片形状精确检测、空间碎片构件识别等方面还有待提升^[62]。随着空间技术的发展,空间系统的功能也将日趋复杂,以适应更加复杂空间环境下的探测任务需求,也会对空间目标感知精度提出更高的要求。例如对我方构成威胁的空间目标或一些需要特别侦察的空间碎片,需要对其外形结构、材质特征、部件构成等特性进行精细重建与识别,从而为空间态势的准确研判提供依据。

参 考 文 献

- [1] Mejia-Kaiser M. IADC space debris mitigation guidelines [M]//The geostationary ring. Leiden: Brill Nijhoff, 2020: 381-389.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2021 中国的航天 [M]. 北京: 人民出版社, 2022: 1-32.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's space program: a 2021 perspective[M]. Beijing: People's Publishing House, 2022: 1-32.
- [3] National Aeronautics and Space Administration. The intentional destruction of cosmos 1408[J]. Orbital Debris Quarterly News, 2022, 26(1): 1-10.
- [4] 卢万杰. 空间目标态势认知与服务关键技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020: 5-8.
Lu W J. Research on key technologies of space object situation cognition and service[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020: 5-8.
- [5] Klinkrad H, Tremayne-Smith R, Alby F, et al. Europe's eyes on the skies: the proposal for a European Space Surveillance System[J]. ESA Bulletin. Bulletin ASE. European Space Agency, 2008, 2008(133): 42-48.
- [6] 蔡炆烁, 高鹏骐, 沈鸣, 等. APOSOS 项目 15 cm 光电望远镜故障监测方法研究[J]. 天文研究与技术, 2018, 15(2): 188-194.
Cai Y S, Gao P Q, Shen M, et al. Study on monitor and diagnostic method of APOSOS 15 cm opto-electrical telescopes[J]. Astronomical Research & Technology, 2018, 15(2): 188-194.
- [7] Valicka C G, Garcia D, Staid A, et al. Sensor network scheduling under uncertainty: models and benefits[R]. Albuquerque: Sandia National Lab, 2016: 2.
- [8] 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 Press, 2007: 469-473.
- [9] 杜建丽. 面向空间碎片编目的天基监测系统研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 90-92.
Du J L. Researches on space-based surveillance system for cataloging space debris[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 90-92.
- [10] 李曦. 空间目标监视网的性能分析方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 6-12.
Li X. A research on performance analysis of the space surveillance network[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 6-12.
- [11] 冯楠. 空间目标资源调配系统的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2017: 2-8.
Feng N. The design and implementation of space target resource allocation system[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 2-8.
- [12] Klinkrad H. Space debris: models and risk analysis[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2006: 31-33.
- [13] 张鲁薇. 空间目标广域探测阵列光学系统关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021: 4-6.
Zhang L W. Research on key technologies of optical system arrays for wide-field observation of space targets [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021: 4-6.
- [14] 代科学, 冯占林, 万歆睿. 俄罗斯空间态势感知体系发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(3): 233-238.
Dai K X, Feng Z L, Wan X R. Study on developments of space situation awareness system in Russia[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(3): 233-238.
- [15] Guo X Z, Gao P Q, Shen M, et al. Introduction to APOSOS project: 15 cm aperture electro-optical telescopes to track space objects[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(8): 1990-2002.
- [16] 杨臣威, 姜鹏, 贾明皓, 等. 中国南极昆仑站低轨空间碎片监测优势及CSTAR望远镜实测[J]. 极地研究, 2019, 31(2): 128-133.
Yang C W, Jiang P, Jia M H, et al. Station characteristics and CSTAR data measurement of Leo space-debris monitoring at Kunlun Station, Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2019, 31(2): 128-133.
- [17] Abercromby K J, Seitzer P, Rodriguez H M, et al. Survey and chase: a new method of observations for the Michigan Orbital DEbris Survey Telescope (MODEST) [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(1/2): 103-111.
- [18] Schildknecht T, Flohrer T, Musci R, et al. Statistical analysis of the ESA optical space debris surveys[J]. Acta Astronautica, 2008, 63(1/2/3/4): 119-127.
- [19] Herzog J, Schildknecht T, Hinze A, et al. Space surveillance observations at the AIUB Zimmerwald observatory[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris, April 22-25, 2013, Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Debris Office, 2013: SP-723.

- [20] Šilha J, Krajcovic S, Zigo P, et al. Development and operational status of AGO70 telescope[C]//Proceedings of the 8th European Conference on Space Debris, April 20-23, 2021, Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Debris Office, 2021: 1-5.
- [21] Silha J. Small telescopes and their application in space debris research and space surveillance tracking[J]. *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, 2019, 49: 307-319.
- [22] Muntoni G, Montisci G, Pisanu T, et al. Crowded space: a review on radar measurements for space debris monitoring and tracking[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1364.
- [23] Persico A R, Kirkland P, Clemente C, et al. CubeSat-based passive bistatic radar for space situational awareness: a feasibility study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 55(1): 476-485.
- [24] Theodorou I, Ilioudis C, Clemente C, et al. SISRAR imaging for space debris based on nanosatellites[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(8): 1192-1201.
- [25] Creed L, Graham J, Jenkins C, et al. STRATHcube: the design of a CubeSat for space debris detection using in-orbit passive bistatic radar[C]//Proceedings of the 72nd International Astronautical Congress, October 25-29, 2021, Dubai, United Arab Emirates. Paris: International Astronautical Federation, 2021: 1-8.
- [26] Fonder G P, Hack P J, Hughes M R. AN/FSY-3 Space fence system-sensor site one/operations center integration status and sensor site two planned capability[C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, September 19-22, 2017, Maui, USA. Maui: Maui Economic Development Board, 2017, 39: 1008.
- [27] 黄剑. 低轨空间目标雷达探测信息处理技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 7-12.
Huang J. Information processing technique for LEO space object surveillance based on radar system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 7-12.
- [28] Courde C, Torre J M, Samain E, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 602: A90.
- [29] 孟文东, 张海峰, 邓华荣, 等. 基于 1.06 μm 波长的空间合作目标及碎片高精度激光测距试验[J]. *物理学报*, 2020, 69(1): 019502.
Meng W D, Zhang H F, Deng H R, et al. 1.06 μm wavelength based high accuracy satellite laser ranging and space debris detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(1): 019502.
- [30] 李祝莲, 翟东升, 汤儒峰, 等. 基于 532 nm 波长的空间碎片白天激光测距研究与试验[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1112003.
Li Z L, Zhai D S, Tang R F, et al. Research and experiment of space debris daytime laser ranging based on 532 nm wavelength[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1112003.
- [31] 龙明亮, 邓华荣, 张海峰, 等. 1 kHz 重复频率多脉冲皮秒激光器研制及其空间碎片激光测距应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0614001.
Long M L, Deng H R, Zhang H F, et al. Development of multiple pulse picosecond laser with 1 kHz repetition rate and its application in space debris laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0614001.
- [32] Kloth A, Steinborn J, Schildknecht T, et al. On the horizon: new ESA Laser Ranging Station (ELRS) with debris tracking capabilities[C]//Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference, January 22-24, 2019, Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Safety Programme Office, 2019: 1-4.
- [33] 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.
- [34] Šilha J, Pittet J N, Hamara M, et al. Apparent rotation properties of space debris extracted from photometric measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(3): 844-861.
- [35] Kirchner G, Koidl F, Ploner M, et al. Multistatic laser ranging to space debris[C]//Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging, November 11-15, 2013, Fujiyoshida, Japan. Greenbelt: NASA's Goddard Space Flight Center, 2013: 1-9.
- [36] Sciré G, Santoni F, Piergentili F. Analysis of orbit determination for space based optical space surveillance system[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(3): 421-428.
- [37] 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.
- [38] Godefroy A B. The Canadian space program: from black brant to the international space station[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2017: 11-30.
- [39] Olmos D E, Roda F E A, Middleton K, et al. Space-based space surveillance operational and demonstration missions [C]//Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris, April 22-25, 2013, Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Debris Office, 2013: SP-723.
- [40] Hu Y P, Li K B, Liang Y G, et al. Review on strategies of space-based optical space situational awareness[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2021, 32(5): 1152-1166.
- [41] 丛力田. 世界天基雷达技术发展概况[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Cong L T. Development of world's space based radar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [42] Aglietti G S, Taylor B, Fellowes S, et al. The active space debris removal mission RemoveDebris. Part 2: in orbit operations[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 168: 310-322.
- [43] Anz-Meador P, Ward M, Manis A, et al. The space debris sensor experiment[C]//Proceedings of the 1st International Orbital Debris, December 9-12, 2019, Houston, USA. Houston: Meeting and Publication Services, 2019: JSC-E-DAA-TN74830.
- [44] Bauer W, Romberg O, Wiedemann C, et al.

- Development of *in situ* space debris detector[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(9): 1858-1869.
- [45] Hamilton J, Liou J C, Anz-Meador P D, et al. Development of the space debris sensor (SDS) [C]// *Proceedings of the 7th European Conference on Space Debris*, April 18-21, 2017, Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Debris Office, 2017, 7(1): 1-11.
- [46] Corsaro R D, Giovane F, Liou J C, et al. Characterization of space dust using acoustic impact detection[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 140(2): 1429-1438.
- [47] 解延浩, 马驰, 钟兴, 等. 基于“吉林一号”视频卫星的天基空间目标观测研究[J]. *空间碎片研究*, 2019, 19(4): 13-20.
Xie Y H, Ma C, Zhong X, et al. Research on space-based space target observation based on “Jilin-1” video satellite[J]. *Space Debris Research*, 2019, 19(4): 13-20.
- [48] 李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计[J]. *宇航学报*, 2010, 31(12): 2746-2753.
Li D J, Liu B, Yin J F, et al. Analysis and design of spaceborne MMW radar for space debris observation system[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(12): 2746-2753.
- [49] Fitzmaurice J, Bédard D, Lee C H, et al. Detection and correlation of geosynchronous objects in NASA’s Wide-field Infrared Survey Explorer images[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 183: 176-198.
- [50] Silha J, Linder E, Hager M, et al. Optical light curve observations to determine attitude states of space debris [C]// *Proceedings of 30th International Symposium on Space Technology and Science*, July 4-10, 2015, Kobe-Hyogo, Japan. Tokyo: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015: 1-4.
- [51] 王玉朋, 牛照东, 王东亚, 等. 考虑杂散光影响的天基光学观测图像仿真算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0229001.
Wang Y P, Niu Z D, Wang D Y, et al. Simulation algorithm for space-based optical observation images considering influence of stray light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0229001.
- [52] Do H N, Chin T J, Moretti N, et al. Robust foreground segmentation and image registration for optical detection of GEO objects[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(3): 733-746.
- [53] Zhu L Y, Liu Y S, He D P, et al. An efficient target detection algorithm via Karhunen-Loève transform for frequency modulated continuous wave (FMCW) radar applications[J]. *IET Signal Processing*, 2022: 1-11.
- [54] Vierinen J, Kastinen D, Markkanen J, et al. 2018 Beam-park observations of space debris with the EISCAT radars[C]// *Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference*, January 22-24, 2019, Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Safety Programme Office, 2019: 1-10.
- [55] 李恭强, 刘静, 程昊文. 空间碎片激光测距技术及应用[J]. *空间碎片研究*, 2020, 20(4): 40-48.
Li G Q, Liu J, Cheng H W. Space debris laser ranging technology and applications[J]. *Space Debris Research*, 2020, 20(4): 40-48.
- [56] Smith C H, Greene B. The EOS space debris tracking system[C]// *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, September 10-14, 2006, Maui, USA. Maui: Maui Economic Development Board, 2006, 2: 1008.
- [57] Laas-Bourez M, Wailliez S, Deleflie F, et al. First astrometric observations of space debris with the MéO telescope[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(3): 603-611.
- [58] Zhang H F, Long M L, Deng H R, et al. Developments of space debris laser ranging technology including the applications of picosecond lasers[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 10080.
- [59] Kirchner G, Koidl F. Laser ranging to space debris from Graz laser station[J]. *Vermessung and Geoinformation*, 2015, 66(2/3): 151-155.
- [60] 龙明亮, 张海峰, 邓华荣, 等. 距离千米级双望远镜的空间碎片激光测距[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0228002.
Long M L, Zhang H F, Deng H R, et al. Laser ranging for space debris using double telescopes with kilometer-level distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0228002.
- [61] 陈龙, 刘承志, 李振伟, 等. 空间目标共视观测定位的误差分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0604001.
Chen L, Liu C Z, Li Z W, et al. Error analysis of space objects common-view observation positioning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0604001.
- [62] 杨小姗, 潘雪峰, 苏少杰, 等. 数据驱动的空间目标图像信息感知技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0315002.
Yang X S, Pan X F, Su S J, et al. Data-driven awareness technology for space target image information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0315002.