

# 光学学报

## 天基空间碎片可见光观测系统与关键技术发展概述

郑珍珍, 朱振才\*, 康一舟

中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304

**摘要** 伴随着航天技术井喷式发展和太空力量的迅猛推进, 人类在太空的活动越来越频繁, 期间产生了数量庞大的空间碎片, 严重威胁了在轨航天器与航天员的安全。为应对空间碎片带来的潜在危险, 快速观测空间碎片状态, 获取尺寸、外形、运动状态等特征信息尤为重要。本文对现有的天基空间碎片观测系统及其技术手段进行了归纳与总结, 并提出若干发展建议, 探究天基空间碎片观测手段的发展趋势, 为构建未来天基空间碎片的观测系统提供参考。

**关键词** 测量; 空间碎片; 天基观测; 发展趋势

中图分类号 V11 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1712002

### Overview of Space-Based Optical Observation Systems for Space Debris and Development of Key Technologies

Zheng Zhenzhen, Zhu Zhencai\*, Kang Yizhou

Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China

**Abstract** With the explosive development of aerospace technology and the rapid advancement in space power, space activities have become increasingly frequent. As a result, a huge amount of space debris is generated, which seriously threatens the safety of on-orbit spacecraft and astronauts. Considering the potential danger brought by space debris, it is particularly important to quickly observe the state of space debris and obtain characteristic information such as size, shape, and motion states. This paper summarizes the existing space-based space-debris observation systems and their technical means and puts forward some development suggestions to explore the development trends of space-based space-debris observation means and provide a reference for the construction of future space-based space-debris observation systems.

**Key words** measurement; space debris; space-based observation; development trends

## 1 引言

随着 21 世纪航天技术的急速发展, 空间碎片数量与日俱增, 严重地威胁着在轨运行航天器以及航天员的安全<sup>[1]</sup>。目前尺寸超过 10 cm 的空间碎片在轨数量超过 3 万块, 尺寸为 1~10 cm 的碎片超过 90 万块, 尺寸小于 1 cm 的碎片超过 1 亿块<sup>[2]</sup>。根据凯斯勒综合征 (Kessler Syndrome) 的定义, 碎片撞击极有可能引发连锁反应, 产生数量更加庞大、体积更加微小的空间碎片<sup>[3]</sup>。空间碎片通常包含失效航天器、火箭体、破裂碎片等<sup>[4-5]</sup>。

空间碎片观测是指对空间碎片的位置、形状、尺寸、运动状态等信息进行获取, 是空间碎片的预警、规

避和清除中必不可少的环节, 对保障空间安全有着重要的意义。目前碎片观测主要依赖于地基系统。地基空间碎片观测系统主要采用主动探测雷达和光学望远镜等手段进行监测, 也是目前美国等发达国家的发展重点。受地球大气(包括大气衍射效应和大气湍流效应)的影响, 地基光学观测手段遇到天然的技术瓶颈<sup>[6-8]</sup>。

与地基系统相比, 天基空间碎片观测不受地域与气候环境的限制, 机动灵活, 且可近距离观测, 是未来碎片观测体系发展的一个重要方向<sup>[9]</sup>。本文对现有国内外的天基碎片观测系统及技术手段进行梳理与归纳, 并对未来的天基空间碎片观测系统的发展提出若干建议。

收稿日期: 2022-05-31; 修回日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-07-11

基金项目: 2021 年度青年拔尖人才计划 (29Y1ZKRCYG01)

通信作者: \*zhuzc@microsat.com

## 2 国外发展现状

### 2.1 美国发展现状

美国开展天基系统研究的时间最早,其天基态势系统的观测能力目前世界领先。1996年美国发射了中段太空实验卫星(MSX),用于演示、验证光学天基观测能力<sup>[10-11]</sup>。2000年10月,MSX正式成为美国空间观测网的一部分。美国天基空间监视系统(SBSS)的监测对象为低地球轨道光学遥感卫星星座,目前在轨的是2010年发射的SBSS-1星<sup>[10-12]</sup>。可操作精化星历表天基望远镜(STARE)纳卫星STARE-1和STARE-2技术试验卫星分别于2012、2013年发射<sup>[13]</sup>。2017年美国发射了一颗低轨赤道空间观测卫星ORS-5<sup>[14]</sup>,用于空间目标及碎片观测。2014年,美国开始部署地球同步轨道空间态势感知(GSSAP)项目,分别于2014、2016、2022年发射GSSAP-1/2星、GSSAP-3/4星以及GSSAP-5/6星,完成六星组网<sup>[15-16]</sup>。另外,美国开发部署了国防太空体系架构(NDSA)以及“黑杰克”低轨卫星星座计划,进一步提升对空间目标及碎片的观测能力<sup>[17-21]</sup>。

#### 1) SBSS

SBSS系统是美国部署的空间目标观测系统,用于探测、识别与跟踪空间目标及碎片的卫星星座系统。目前已知在轨的一颗SBSS卫星位于太阳同步近地轨道,可对大于5 cm的低轨目标以及大于50 cm的高轨目标进行探测、编目。卫星具备优秀的信息获取技术和目标定轨技术,首先通过星载高灵敏度可见光探测器(SBV)获得目标图像信息,相机口径为30 cm,并将图像信息发送到星载信息处理器进行处理,定轨精度为500 m;然后将检测到的特征信息下发到地面处理中心(具有快速任务规划能力),地面中心对目标位置

进行精确估计<sup>[11,13,22]</sup>。

#### 2) STARE纳卫星

2012年和2013年,STARE-1和STARE-2星相继发射入轨。该系统在地基观测资料的基础上,根据天基的观测数据更新目标轨道参数,使目标星历更加精准,具备信息获取技术,具有比美国空间监视网(SSN)更精确的目标定轨技术,以及比空间碰撞预警信息支持技术更低的空间目标及碎片碰撞预警的虚警概率<sup>[13]</sup>。STARE-A卫星采用立方星的3U结构,具体指标如表1所示。

#### 3) GSSAP项目

在MiTeX卫星的技术基础上,美国部署了GSSAP项目,目前已完成六星组网。GSSAP以抵近观察模式为主,选用GEOStar-1平台,星上携带高分辨率相机(图像分辨率达cm量级)与高性能电子侦收设备,将其部署在地球同步轨道附近,并围绕这一轨道上下浮动,以实现“邻近区域”观测<sup>[16]</sup>。GEOStar-1卫星平台使用双推进剂系统提供机动力,单推进剂系统保持定点机动和轨道微调,星敏感器和陀螺仪负责确定姿态,GPS提供轨道确定和授时,总体GEOStar-1的指向误差优于0.4 mrad,定位精度为50 m<sup>[23]</sup>。GSSAP卫星具备先进的可见光信息获取技术、信息处理技术以及轨道机动能力,能够识别目标并预测其轨迹,主要的任务控制由地面站完成,其感知能力已经超越了空间碎片编目的基础应用层级,向高精度实时探测发展<sup>[24]</sup>。

#### 4) NDSA

美国太空发展局(SDA)提出构建NDSA,以提供一种全覆盖实时信息获取和通信能力<sup>[17]</sup>。通过体系化的架构建设,实现对包括空间目标及碎片的观测系统在内的天基系统的资源配置优化。该太空体

表1 STARE-A卫星指标  
Table 1 STARE-A satellite indicators

Item	Parameter	
Weight	15 kg	
Size	9.75 cm × 9.75 cm × 30 cm	
Orbit determination accuracy	100 m	
Satellite structure	3U CubeSat	
Platform	Colony II	
Optical payload	Cassegrain structure, CMOS detector	
Output data rate	<50 kbit/s	
Track height	700 km	
Orbital inclination	98°	
Orbit determination time	Orbit set 1 day before collision	
Observation target characteristics	Observation distance	<100 km
	Target size	<1 m <sup>2</sup>
	Relative velocity	<3 km/s
	Observation spectrum	Visible light
	Target SNR	>2.5
False alarm rate	About 0.1 times to 10 times a day	

系架构由 7 层组成,包括支持层、监管层、传输层、跟踪层、威慑层、管理层和导航层<sup>[18]</sup>。其中:威慑层(deterrence layer)主要用于探测和跟踪空间物体,避免卫星碰撞,并配备先进传感器元件,具备目标/背景特征识别技术,具备星上处理和通信能力;传输层(space transport layer)通过部署星间光链路(OISL)系统,形成射频链路和光学链路共存,实现星间快速通信;管理层(management layer)主要具备星上自主任务规划能力,可减少地面系统的依赖<sup>[19]</sup>。NDSA 的关键技术包括星座系统运行管理技术、星上信息获取技术(可见光、红外、雷达)、自主信息处理技术(识别、定轨、跟踪)、自主任务规划技术等。

表 2 “黑杰克”项目的主要任务<sup>[20]</sup>Table 2 Main tasks of the Black Jack project<sup>[20]</sup>

Mission	Task content
Autonomous on-orbit decision-making	Develop payload and mission-level autonomous software (including on-orbit distributed decision processors) and demonstrate autonomous orbital operations. The payload can operate autonomously through on-orbit data processing, and the system will autonomously perform on-orbit sharing tasks according to high-level system instructions
Advanced commercial manufacturing technology	Develop and implement advanced commercial manufacturing of military payloads and spacecraft platforms, with plans to use commercial off-the-shelf (COTS)-type components to develop high-speed manufacturing processes and reduce screening and acceptance testing of spacecraft, thereby enabling low-cost spacecraft manufacturing
LEO constellation performance demonstration	Low earth orbit (LEO) demonstration validates satellite payloads. Its capabilities are comparable to current geostationary (GEO) orbit systems, enabling a combined cost of less than \$6 million per satellite platform, payload, and launch
Ultimate goal	Develop a constellation of 60 to 200 satellites operating at an altitude of 500 to 1300 km. Data processing for the "Black Jack" payload will be done on-orbit without the support of ground segment. Constellation is able to operate without an operations center for 30 days

## 2.2 其他国家发展现状

天基空间碎片观测一直是整个空间技术发展的热点应用领域。2003 年 5 月 30 日,加拿大发射“恒星微振动观测”(MOST)卫星,主要元件为 15 cm 的点目标成像高精度光学望远镜。除了本身的天文观测任务外,MOST 卫星还进行天基空间碎片系统关键技术的验证试验<sup>[11]</sup>。

2000 年,由英国萨里卫星技术公司设计制造的 SNAP-1 实验小卫星发射,装载 4 台 350 pixel×288 pixel 的 CMOS 相机,其中:3 台相机的视场角均为 90°,组合可观测 270°视场范围;另一台相机配备长焦镜头,用于成像和测量。卫星上的微推进系统使其具有一定的抵近观察机动性。

2013 年 2 月,加拿大发射“蓝宝石”(Sapphire)卫星和“近地空间目标观测”(NEOSSat)卫星,实现对 6000~40000 km 深空中滞留空间碎片的跟踪,并与美国 SSN 链接,共享监测数据<sup>[10]</sup>。

## 3 天基可见光观测技术

可见光观测技术是一种获取目标特性的被动探测手段,是目前天基系统应用最为广泛的技术手段。获

### 5) “黑杰克”项目

美国国防高级研究计划局(DARPA)于 2018 年 2 月启动“黑杰克”项目。该项目是 NDSA 下的一个演示论证平台项目,利用一个由庞大的低轨卫星群组成的星座实现对多种目标、碎片的检测、识别与跟踪。每颗卫星由一个商业化卫星平台、一个 PitBoss 控制单元(一个自主协同任务管理系统)以及一个或多个有效载荷组成,且支持频繁的星上技术升级<sup>[20-21]</sup>。商业化卫星平台将采用开放式架构,能够为不同类型的有效载荷提供条件<sup>[22]</sup>。“黑杰克”项目的关键技术除了先进的信息获取、信息处理技术外,还包括星上自主任务规划、协同管理技术,其主要任务内容如表 2 所示。

取的可见光图像所含信息丰富,可以描述目标的亮度特性、结构特征以及材料特性。

常用可见光观测技术有两种应用场景,分别为远距离点目标探测和近距离清晰成像。近距离清晰成像主要用于获取目标的具体形貌,与常规对地观测系统类似。碎片观测基于点目标探测方式,通过天基平台搭载的光电传感器获取空间碎片的点目标观测图,如图 1 所示。在此基础上,对得到的观测图像序列进行相应处理,从而得到空间碎片的灰度特征和空间位置,

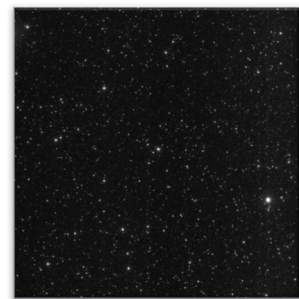


图 1 点目标探测效果

Fig. 1 Target detection result

再进行编目定轨<sup>[25]</sup>。

### 3.1 可见光探测系统的基本原理

图 2 为典型天基点目标特性获取的光电探测系统示意图。入射辐射源是目标与背景的辐射或散射

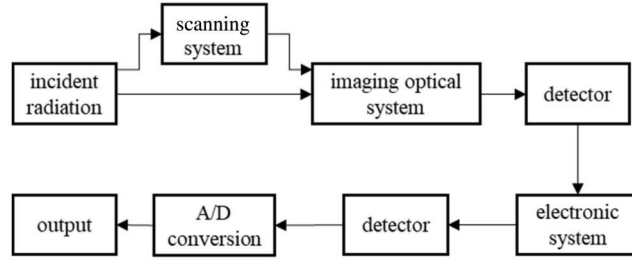


图 2 光电成像系统示意图

Fig. 2 Schematic of photoelectric imaging system

用来衡量系统对空间碎片观测能力的主要技术指标为系统探测能力  $m$  及对应获取的目标信噪比阈值  $T_{SR}$ , 它们的关系取决于观测系统的光学系统透过率  $\tau_0$ 、有效通口径  $D$ 、系统弥散斑直径  $d$  以及像元尺寸  $a$ 、平均量子效率  $\eta$ 、暗电流噪声  $N_D$  和系统曝光时间  $t_0$  等, 具体可表示为

$$m \leq -\log_{2.512} \left\{ \frac{683 \times 10^6}{5.3} \times \frac{[T_{SR}^2 + \sqrt{T_{SR}^4 + 4(N_D + N_B)T_{SR}^2}] d^2 hc}{\bar{\lambda} D^2 \eta \tau_0 t_0 a^2} \right\}, \quad (1)$$

式中:  $\bar{\lambda}$  为平均波长;  $N_B$  为背景噪声产生的光电子数, 受限于背景产生的散射强度差。提高成像质量和探测灵敏度的方法通常有适当延长相机曝光时间、多帧相加、优化成像算法、增大光学系统有效孔径、降低空间杂散光与 CCD 传感器噪声等<sup>[26-28]</sup>。

在探测系统设计中, 目标信号最终在图像中的分布尺寸在  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  以上, 因此一般要求像面信噪比大于 5, 以便于后续目标检测提取, 同时尽可能避免地光、日光、月光带来的光照条件影响<sup>[29-30]</sup>。

### 3.2 碎片目标散射特性

目标的散射特性直接决定了目标在像面的信号强度。系统依靠目标与背景的散射强度差来区别目标与背景。目前对于目标散射特性的研究大多基于假定的朗伯漫反射模型或双向反射分布函数(BRDF)<sup>[31-33]</sup>, 其中 BRDF 对光散射特性的描述比朗伯漫反射模型更复杂, 但所得结果更加精确。

BRDF 的定义为沿出射方向的反射辐射亮度  $dL_r$  与沿入射方向到达被测表面的辐照度  $dE_i$  之比, 其几何关系如图 3 所示, 表达式为

$$f_i(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (2)$$

式中:  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  为入射天顶角和方位角;  $\theta_r$  和  $\varphi_r$  为反射天顶角和方位角;  $\lambda$  为波长。辐照亮度定义为沿辐射方

光波, 光子学系统主要用于辐射或散射光通量接收, 探测器子系统可对目标、背景成像并实现电信号转换, 电子学子系统包括信号提取、增强、滤波、转换等部分。

向单位面积、单位立体角的辐射通量; 辐照度定义为单位面积的辐射通量。

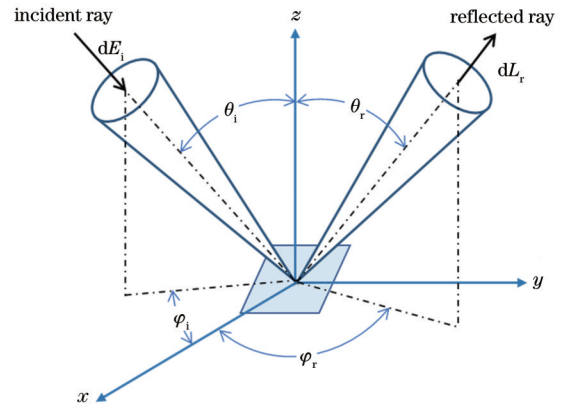


图 3 BRDF 几何关系图

Fig. 3 Geometrical relationship of BRDF

相机系统入瞳处接收到的光通量包括碎片经太阳光照射后, 反射太阳光到达传感器的辐射亮度  $L_s(\lambda)$ 、经大气散射光照射后到达传感器的辐射亮度  $L_{atd}(\lambda)$ , 以及碎片面元与传感器之间的大气后向散射光在传感器像面形成的杂散背景  $L_{atu}(\lambda)$ , 则

$$L_s(\lambda) = \rho(\lambda) \times E_s(\lambda) \times \tau_u(\lambda) = \rho(\lambda) \times \tau_d(\lambda) \times \tau_u(\lambda) \times E_s^0(\lambda) \times \cos \theta, \quad (3)$$

$$L_{atd}(\lambda) = P \times E_{at}(\lambda) \times \rho(\lambda) \times \tau_u(\lambda), \quad (4)$$

式中:  $\rho(\lambda)$  为物体表面的漫反射率;  $E_s(\lambda)$  为到达目标的太阳辐照度;  $\tau_d(\lambda)$  为太阳到目标的大气光谱透过率;  $\tau_u(\lambda)$  为目标到传感器之间的大气光谱透过率;  $E_s^0(\lambda)$  为目标实际接收的太阳辐照度;  $\theta$  为目标表面法向量矢量与太阳入射光之间的夹角;  $E_{at}(\lambda)$  为目标面元在无遮挡、无倾斜时大气层对其产生的总散射辐照度; 参数  $P$  为目标面元能够接收的大气散射光占比。

在此基础上, 很多学者对 BRDF 模型如 Maxwell Bread 模型、Davies BRDF 模型、Torrance-Sparrow 模型、五参数模型、四参数单站模型、Sun BRDF 模型等的建模和优化进行了研究。相比之下, 五参数模型具

有速度快、精度高、适应性强等优势,目前使用较多<sup>[31,33-36]</sup>。

### 3.3 天基观测系统的物像关系

整个天基的观测系统可以视为通过一系列坐标变换实现碎片的几何定位,即从地球中心惯性(ECI)坐标系最终变换为像平面坐标系。碎片在像平面坐标的示意图如图 4 所示。

图 4 中,  $O$ - $XYZ$  为 ECI 坐标系,空间碎片在其中的坐标为  $(X, Y, Z)$ ;  $o$ - $xy$  为像平面坐标系;  $S$  为投影中心,其在 ECI 坐标系中的坐标设为  $(X_s, Y_s, Z_s)$ ;  $f$  为焦距,像点在  $o_s$ - $x_s y_s z_s$  的坐标系中坐标为  $(x_s, y_s, -f)$ 。通常空间碎片与传感器的距离远大于  $f$ ,故  $S$  在 ECI 坐标系中的位置近似认为是观测平台的位置,依据共线条件方程,得到一个坐标变换关系<sup>[27]</sup>:

$$\begin{cases} x_s = -f \frac{a_{11}(X - X_s) + a_{12}(Y - Y_s) + a_{13}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)} \\ y_s = -f \frac{a_{21}(X - X_s) + a_{22}(Y - Y_s) + a_{23}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (5)$$

矩阵  $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$  为  $o_s$ - $x_s y_s z_s$  坐标系相对于 ECI 坐标系的旋转矩阵。

在实际应用中,整个成像系统与卫星的传感器指向、姿态参数、卫星与碎片的相对速度、相机震动等因素密切相关,一般视天基观测系统为一个线性时空不变系统。成像模型的坐标变换过程如图 5 所示,最终将物方坐标变换为像方坐标。

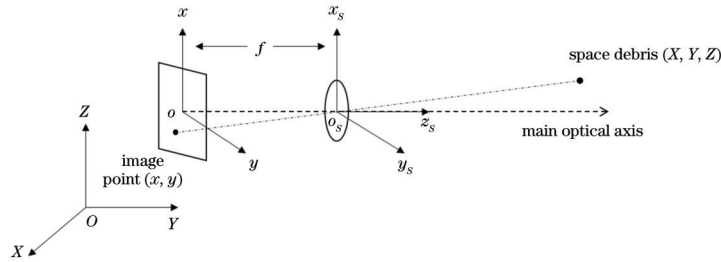


图 4 光学成像模型

Fig. 4 Optical imaging model

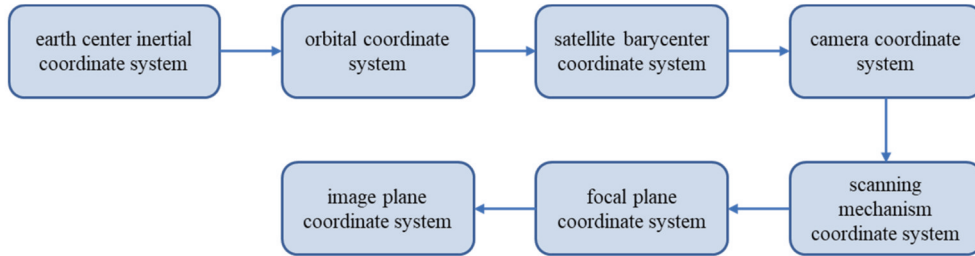


图 5 成像模型坐标变换过程<sup>[26,37]</sup>

Fig. 5 Imaging model coordinate transformation process<sup>[26,37]</sup>

## 4 未来天基碎片观测系统及技术发展趋势

鉴于目前技术的推动以及未来碎片动态、实时、精准探测需求的牵引,天基空间碎片观测系统将向“更小目标、更高精度、更快时效、更准识别”的目标发展,要求进一步提升天基可见光观测与成像精度,发展红外、雷达、多光谱等其他探测技术,发展星上自主任务规划与处理技术,建设具备光学成像探测、红外成像探测、合成孔径雷达监测和激光成像搜索等功能的空间碎片观测系统,实现全域碎片编目与实时探测。目前天基碎片感知技术的发展思路如图 6 所示。

采用分布式、可扩展的小型卫星星座来增加卫星系统的弹性,构建全方位、多层次的太空架构,形成全时段、全覆盖的空间碎片观测体系,是美国未来部署太空卫星发展项目的重要趋势之一<sup>[19]</sup>。美国已经意识到

低轨卫星系统的潜在优势,并逐渐将卫星部署理念转向“弹性、经济、规模化”,同时开发开放式、模块化的处理平台架构,提升星上自主能力,配备先进的星上信息获取技术、星上处理技术、通信技术等。未来的天基碎片感知体系可能将更多地使用低成本的小卫星星座来代替现有的高价值大型卫星。

在观测技术方面,越来越重视信息获取手段的多样性、星上数据处理的智能化以及星上任务的自主化。

### 4.1 多样化的信息获取技术

对现有探测成像技术的突破主要体现在可见光方面:研究偏振成像技术,利用碎片的偏振特性提高对目标的识别率;研究点目标多光谱、高光谱探测技术,提高对目标材质属性的判断能力,增加特性维度。同时,受到卫星体积、功耗等的限制,研究各种新型可见光信息获取技术,实现大视场、高灵敏度的空间碎片探测,例如在轨自适应光学成像技术、小视场高精度测角系

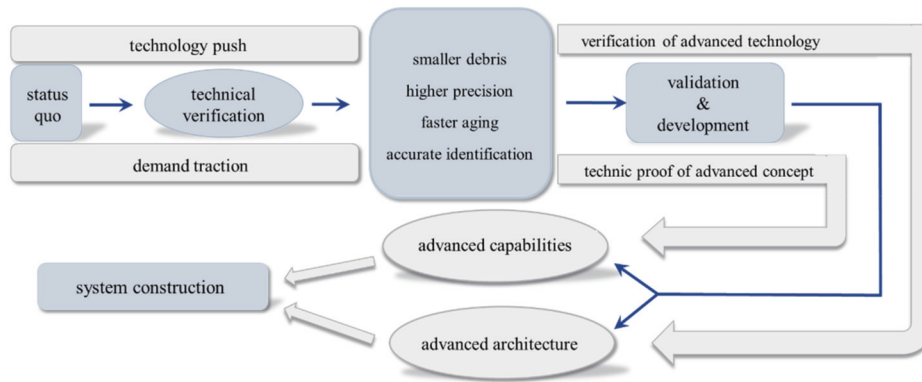


图 6 天基碎片感知技术的发展思路

Fig. 6 Development ideas for space-based debris sensing technology

统与超广角低精度系统的结合等<sup>[28,38-39]</sup>。此外,研究红外探测技术、激光/微波探测技术等,实现更强的信息获取能力。

#### 4.2 智能化的星上数据处理技术

对基于多源获取的多维数据,例如可见光、偏振光、红外光、雷达等获取的多种信息进行融合,获得被测对象的一致性解释或描述,使天基碎片探测系统获得比单纯各子系统的集合更优越的性能。研究数据源选择策略、特征层融合技术、高精度配准技术以及基于融合数据的图像增强技术,可使星上处理方式更加智能。

#### 4.3 自主化的星上任务规划技术

将卫星视为一个智能体,发展自主任务规划技术,提高卫星应对突发情况的自主决策能力,提升卫星在探测过程中的自适应能力,提高卫星任务过程中的灵活性、精细度,降低地面系统的压力<sup>[39-43]</sup>,增强应对突发情况的自主决策能力,也是未来系统的发展趋势。

### 5 结束语

未来的天基空间碎片观测系统的发展需要关键技术的支撑、卫星系统的优化设计以及观测体系的构建。相比美国,我国目前的天基空间碎片观测系统尚处于快速发展阶段,需要实现对碎片搜索发现、观测详查以及抵近处理。迫切需要进一步建设碎片弹性观测体系,发展多观测手段、智能星上数据处理以及自主任务规划等专项技术,最终实现高时效、广空域的空间碎片观测。

#### 参 考 文 献

[1] Popova R, Schaus V. The legal framework for space debris remediation as a tool for sustainability in outer space[J]. *Aerospace*, 2018, 5(2): 55.  
 [2] 汤靖师, 程昊文. 空间碎片问题的起源、现状和发展[J]. *物理*, 2021, 50(5): 317-323.  
 Tang J S, Cheng H W. The origin, status and future of space debris[J]. *Physics*, 2021, 50(5): 317-323.  
 [3] Kessler D J, Cour-Palais B G. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt[J]. *Journal*

of Geophysical Research, 1978, 83(A6): 2637-2646.  
 [4] Anz-Meador P D, Opiela J N, Shoots D, et al. History of on-orbit satellite fragmentations[M]. 15th ed. Houston: NASA Johnson Space Center, 2018.  
 [5] Liou M K J C, Drew A, Sweet A. The 2019 U. S. government orbital debris mitigation standard practices [EB/OL]. [2021-02-05]. [https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/usg\\_orbital\\_debris\\_mitigation\\_standard\\_practices\\_november\\_2019.pdf](https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/usg_orbital_debris_mitigation_standard_practices_november_2019.pdf).  
 [6] 郝雅楠, 陈杰, 祝彬, 等. 美军地基空间态势感知系统的现状与趋势[J]. *国防科技工业*, 2019(3): 34-37.  
 Hao Y N, Chen J, Zhu B, et al. Present situation and trend of ground-based space situational awareness system of US military[J]. *Defence Science & Technology Industry*, 2019(3): 34-37.  
 [7] 张忠萍, 程志恩, 张海峰, 等. 地基激光测距系统观测空间碎片及其探测能力研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(3): 0329001.  
 Zhang Z P, Cheng Z E, Zhang H F, et al. Observation of space debris by ground-based laser ranging system and research on detecting ability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0329001.  
 [8] 周一宇, 李骏, 安玮. 天基光学空间目标监视信息处理技术分析[J]. *光电工程*, 2008, 35(4): 43-48.  
 Zhou Y Y, Li J, An W. Information processing technology in optical space-based space surveillance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(4): 43-48.  
 [9] 乔凯, 王治乐, 丛明煜. 空间目标天基与地基监视系统对比分析[J]. *光学技术*, 2006, 32(5): 744-746, 749.  
 Qiao K, Wang Z L, Cong M Y. Analysis on space based and ground based surveillance system to space target[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 744-746, 749.  
 [10] 郝雅楠, 陈杰, 张京男. 美军天基空间态势感知系统的新发展[J]. *国防科技工业*, 2019(3): 41-45.  
 Hao Y N, Chen J, Zhang J N. New development of space-based situation awareness system of US army[J]. *Defence Science & Technology Industry*, 2019(3): 41-45.  
 [11] 汤泽滢, 黄贤锋, 蔡宗宝. 国外天基空间目标监视系统发展现状与启示[J]. *航天电子对抗*, 2015, 31(2): 24-26, 30.  
 Tang Z Y, Huang X F, Cai Z B. Development status

- and enlightenment of foreign space-based space surveillance systems[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2015, 31(2): 24-26, 30.
- [12] 崔潇潇. 美国天基空间目标监视系统概况[J]. 国际太空, 2011(7): 37-43.  
Cui X X. Overview of space-based target surveillance system in America[J]. Space International, 2011(7): 37-43.
- [13] 王晓海. 天基空间目标探测系统技术研究进展[J]. 卫星与网络, 2017(11): 64-70.  
Wang X H. Research progress of space-based target detection system technology[J]. Satellite & Network, 2017(11): 64-70.
- [14] SpaceFlight101. SensorSat(ORS-5)[EB/OL]. [2022-05-22]. <https://spaceflight101.com/ors-5/sensorsat/>.
- [15] 宫经刚, 宁宇, 吕楠. 美国高轨天基态势感知技术与启示[J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(1): 1-7.  
Gong J G, Ning Y, Lü N. Development and enlightenment of space based situational awareness technology for high orbit in the United States[J]. Aerospace Control and Application, 2021, 47(1): 1-7.
- [16] 宋瑞, 宋旭民, 高勇, 等. 高轨典型巡视卫星现状及能力分析[J]. 中国航天, 2021(10): 44-48.  
Song R, Song X M, Gao Y, et al. Status of typical high-orbit patrol satellites and capability analysis[J]. Aerospace China, 2021(10): 44-48.
- [17] Messier D. Space development agency seeks next-gen architecture in first RFI[EB/OL]. (2019-07-07)[2022-05-22]. <http://www.parabolicarc.com/2019/07/07/space-development-agency-issues-rfi/>.
- [18] Strout N. The Pentagon's new space agency has an idea about the future[EB/OL]. (2019-07-04) [2022-05-22]. <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/2019/07/03/the-pentagons-new-space-agency-has-an-idea-about-the-future/>.
- [19] 胡旖旎, 钟江山, 魏晨曦, 等. 美国“下一代太空体系架构”分析[J]. 航天器工程, 2021, 30(2): 108-117.  
Hu Y N, Zhong J S, Wei C X, et al. Analysis of US next generation space architecture[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(2): 108-117.
- [20] 蔡亚梅, 陈利玲, 张天娇. 从“黑杰克”项目看美国低轨卫星系统发展[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(4): 57-59, 64.  
Cai Y M, Chen L L, Zhang T J. LEO satellite system development of USA from Blackjack program[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(4): 57-59, 64.
- [21] Strout N. SEAKR moving forward with DARPA's PitBoss project[EB/OL]. (2020-05-04) [2022-05-22]. <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2020/05/03/seakr-moving-forward-with-darpas-pit-boss-project/>.
- [22] 杜小平, 李智, 王阳. 美国太空态势感知能力建设研究[J]. 装备学院学报, 2017, 28(3): 67-74.  
Du X P, Li Z, Wang Y. Research on the building of US space situational awareness capability[J]. Journal of Equipment Academy, 2017, 28(3): 67-74.
- [23] Spacecraft & Satellites. GSSAP Satellite Overview[EB/OL]. [2022-05-22]. <https://spaceflight101.com/spacecraft/gssap/>.
- [24] 刁华飞, 张雅声. 美国高轨态势感知卫星能力分析[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(4): 48-51.  
Diao H F, Zhang Y S. Analysis of US geosynchronous situational awareness satellite capability[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019, 35(4): 48-51.
- [25] 孙成明, 袁艳, 吕群波. 天基空间目标光学散射特性建模与验证[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1129001.  
Sun C M, Yuan Y, Lü Q B. Modeling and verification of space-based optical scattering characteristics of space objects[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1129001.
- [26] 马超. 基于特征点的天基光学图像几何定位技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.  
Ma C. The research on geometric positioning of space-based optical image based on feature points[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [27] 蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.  
Lan C Z. Modeling and detecting capability analysis of space-based space object optical observation system[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009.
- [28] 徐泽明. 天基空间目标探测系统杂散光抑制与处理技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.  
Xu Z M. Research on stray light suppression and processing technology of space-based space target detection system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [29] 周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 68-73, 76.  
Zhou Y P, Shu R, Tao K Y, et al. Study of photoelectric detecting and identifying of space target[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 68-73, 76.
- [30] 史卫朝, 郑建明, 李言, 等. 加工表面双向反射分布函数的测量与建模[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1029001.  
Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function on cutting surface[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1029001.
- [31] 黄建明, 刘鲁江, 王盈, 等. 基于目标可见光散射特性的空间目标成像仿真研究[J]. 上海航天, 2015, 32(5): 39-43, 72.  
Huang J M, Liu L J, Wang Y, et al. Imaging simulation of space target based on target's visible scatter characteristics[J]. Aerospace Shanghai, 2015, 32(5): 39-43, 72.
- [32] 孟庆宇, 张伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2079-2084.  
Meng Q Y, Zhang W, Long F N. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2079-2084.
- [33] 韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 758-766.

- Han Y, Sun H Y. Advances in space target optical scattering character research[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 758-766.
- [34] Maxwell J R, Beard J, Weiner S, et al. Bidirectional reflectance model validation and utilization[R]. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1973.
- [35] 张伟, 汪洪源, 王治乐, 等. 空间目标可见光散射特性建模方法研究[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2462-2467.  
Zhang W, Wang H Y, Wang Z L, et al. Modeling method for visible scattering properties of space target[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2462-2467.
- [36] 陈伟力, 李军伟, 孙仲秋, 等. 典型卫星表面材料可见光偏振特性分析[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1026001.  
Chen W L, Li J W, Sun Z Q, et al. Analysis of visible polarization characteristics of typical satellite surface materials[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1026001.
- [37] 汪璞. 天基光学传感器预警图像校正算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.  
Wang P. Research on early warning image correction algorithm of space-based optical sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [38] 张坤. 高精度大视场空间目标测量光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.  
Zhang K. Research on the space target measuring optical system with high precision and large field of view[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [39] 雍佳伟. 基于自适应光学和图像处理的高分辨成像系统优化控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2020.  
Yong J W. Research on optimal control technology of high resolution imaging system based on adaptive optics and image processing[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [40] 肖化超, 王鹏, 张建华, 等. 遥感卫星在轨图像智能处理设计与验证[J]. 航天器工程, 2022, 31(2): 43-48.  
Xiao H C, Wang P, Zhang J H, et al. Design and verification of on-board intelligent processing technology for remote sensing satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(2): 43-48.
- [41] 蔡萍, 李潇雁, 苏晓峰, 等. 天基红外探测载荷自适应调节方法研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20200076.  
Cai P, Li X Y, Su X F, et al. Research on adaptive adjustment technology for space-based infrared detection load[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200076.
- [42] 彭双. 适应动态需求的卫星观测任务星上连续自主规划方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
Peng S. An approach of autonomous satellite observation task onboard continuous planning for dynamic requests [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [43] 赵毓. 多智能体系统自主规避任务决策方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
Zhao Y. Research on autonomous evasion task decision-making method for multi-agent system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

### 约稿专家简介:



朱振才(1963—), 博士, 研究员/博士生导师, 全国先进工作者, 上海最美科技工作者。1981年考入清华大学精密仪器与机器学专业, 1986年7月本科毕业获得学士学位; 之后在浙江大学光学仪器工程学系继续深造, 分别于1989年、1993年毕业并获得硕士、博士学位。2001—2004年任中国科学院上海技术物理研究所研究员, 2004年进入中国科学院上海微小卫星创新研究院任副主任, 现任中国科学院微小卫星创新研究院党委书记、副院长。主要从事空间目标探测与成像、太阳风磁层相互作用全景成像、先进天基太阳天文台和爱因斯坦探针等科学探测与技术试验卫星项目的研究。E-mail: zhuzc@microsat.com。