

# 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨

姜会林,付强,张雅琳,江伦

(长春理工大学空地激光通信国防重点学科实验室,吉林 长春 130022)

**摘要:** 随着人类探索太空活动的逐年增多,对空间碎片的探测显得尤为重要。文中首先介绍了空间碎片的危害和探测意义,分析了探测空间碎片的主要难点和发展趋势;在此基础上,结合空间碎片的探测难点,提出了一种对空间碎片进行探测与信息传输的新方案,将激光测距、光谱偏振成像、激光通信三种功能融为一体,并进行了关键技术分解和可行性分析,以为空间碎片探测提供一种新的思路。

**关键词:** 空间碎片; 激光探测成像通信; 一体化技术

**中图分类号:** V520 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0401001

## Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris

Jiang Huilin, Fu Qiang, Zhang Yalin, Jiang Lun

(Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** With the increase of human exploration of space activities, space debris detection is particularly important. In this paper, the space debris hazard and detection significance were firstly introduced. Then, the main difficulties and the development trend of space debris detection were analyzed. On this basis, combined with space debris detection difficulties, a new scheme of detection for space debris and information transmission was proposed, which integrated laser ranging, spectral polarization imaging, laser communication features. And the key technology to decompose and feasibility analysis were made, which may provide a new way of thinking for space debris detection.

**Key words:** space debris; laser ranging with polarization spectral imaging and communication; integration technology

收稿日期:2016-03-18; 修订日期:2016-04-07

基金项目:国家自然科学基金(91338116);吉林省科技攻关项目(20150204045GX)

作者简介:姜会林(1945-),男,院士,博士生导师,主要从事空间光电技术、光学设计、激光通信等方面的研究。

Email:HLjiang@cust.edu.cn

## 0 引言

空间碎片是在轨运行或再入大气的无功能的人造物体及其残块和组件<sup>[1]</sup>。由于空间碎片数量众多,对人类空间科技活动造成了严重障碍。据美国空间监视网络观测:直径大于 10 cm 的空间碎片约 1.9 万个;1~10 cm 之间有 50 多万个;1~0.1 cm 之间约有 3 千多万个<sup>[2-3]</sup>。空间碎片的危害极大,对航天器造成破坏,威胁宇航员安全,可能导致轨道资源的破坏,还可能造成空间网络的中断。

人类十分急切探测空间碎片,已成立了机构间空间碎片协调委员会,美、俄、英、中等 14 个国家组成<sup>[4]</sup>。美国、俄罗斯、英国等国家建立了以地基雷达、地基光学、天基监测等多手段组成、在全球布站的监测网。美国目前编目低、高轨碎片 2 万多个,地基光学探测几厘米低轨碎片、10 cm 高轨碎片,地基雷达探测与编目 5 cm 的低轨碎片<sup>[5-7]</sup>。我国空间碎片探测与编目约 8 千个,且探测碎片尺寸较大,国内地基光学可探测约 20 cm 低轨碎片~50 cm 高轨碎片<sup>[8-9]</sup>;天基探测技术滞后,国内仅国家天文台、北京测量与通信研究所于 2014 年开展在轨测试试验,国外已经形成探测与应用<sup>[10-12]</sup>;国内碎片探测技术手段单一,以强度为主,少量单位开展光谱探测,偏振探测更少,国际已实现强度光谱偏振等多维度探测<sup>[13-17]</sup>。空间碎片探测向监测更小尺寸碎片、提高监测时效性和全球性布站、天基光学探测、天地一体化协同监测等方向发展。

空间碎片探测的难点有以下几点:(1) 目标暗弱——导致探测光能量不足,图像信噪比和对比度不够,对暗弱目标的探测困难。(2) 目标运动——导致目标位置持续变化,图像稳定性和强度均衡性差,对运动目标探测困难。(3) 目标尺寸小——导致目标空间分辨率低,图像识别与提取技术要求高,对小尺寸目标探测困难。(4) 距离太远——导致探测碎片图像过小,系统接收能量不足,对远距离碎片探测困难。(5) 背景复杂——导致目标难以识别与提取,且图像对比度较差,对复杂背景下碎片探测困难。

空间碎片探测需求迫切,主要表现在以下几个方面。(1) 探测:研究碎片距离、轨道、运行状况,以便掌握碎片空间状态;(2) 识别:研究碎片大小、光谱、形状,以便掌握碎片类型;(3) 规避:研究碎片分

布及变化,以便飞行体进行有效规避;(4) 清除:研究碎片的清除可能性,以便有效安全地进行清除或移除。为实现有效探测识别空间碎片,并为规避和清除提供快捷准确的信息,文中开展了空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨,提出一种空间碎片激光测距、偏振光谱成像、激光通信“三合一”的系统方案,给出了关键技术和解决途径,并对激光测距、成像探测、激光通信等进行了能量分析。

## 1 系统功能

文中提出的空间碎片激光测距、偏振光谱成像、激光通信一体化的系统方案,其总体功能如图 1 所示,可实现(1) 探测:对空间碎片发现、跟踪、测距,以确定碎片的轨道和运行规律;(2) 成像:对空间碎片的光谱、强度、偏振等信息获取,以确定碎片尺寸、类型、与背景的对比度等;(3) 通信:将探测到的信息发送给技术部门,进行识别与编目,并建立数据库;将探测到的信息发送给航天器,进行预警与规避,保证航天器安全;将探测到的信息发送给管理部门,确定清除或移除方案。

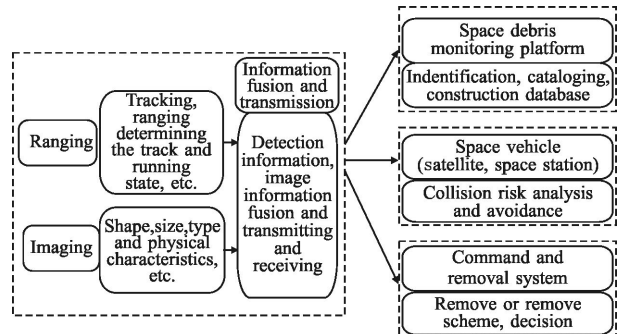


图 1 空间碎片激光探测成像通信一体化系统的总体功能

Fig.1 Overall function of integration technology of laser detection system for space debris

## 2 总体方案

### 2.1 系统组成

空间碎片激光探测成像通信系统总体方案如图 2 所示,由空间碎片探测与跟踪子系统、通信粗跟踪接收子系统、成像与通信(含精跟踪)子系统三部分组成。其中,成像与通信(精跟踪)子系统由卡式光学天线、成像单元、精跟踪单元及通信单元组成。空间碎片探测与跟踪子系统共用一个光学系统。

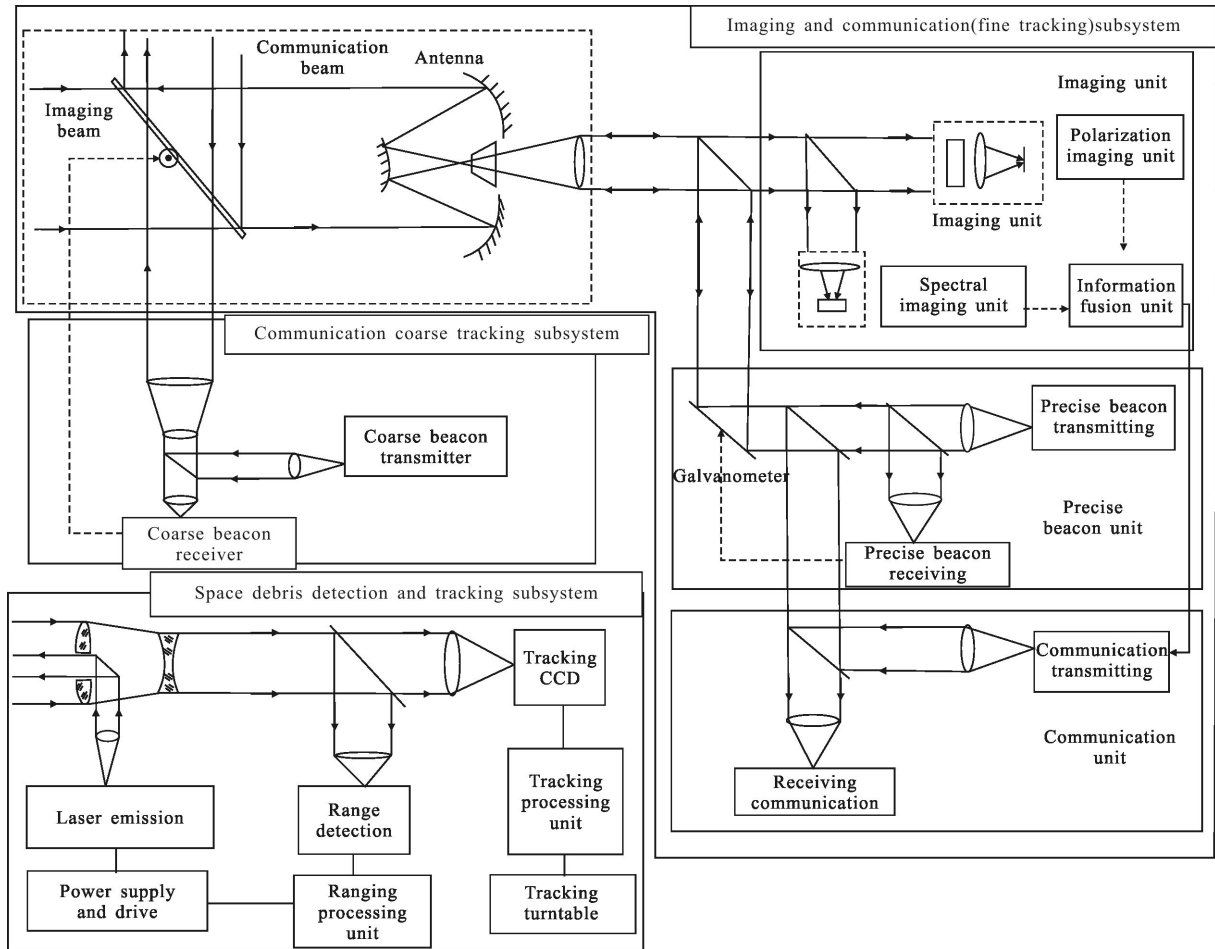


图 2 空间碎片激光探测成像通信系统总体方案图

Fig.2 Overall plan of laser imaging system for space debris

(1) 空间碎片探测与跟踪子系统可发射 1 064 nm 主动激光对空间碎片进行扫描,接收碎片的反射光;通过测距探测器完成对碎片的距离测量、运行轨迹确定;通过跟踪 CCD、处理单元及转台完成对碎片的跟踪。

(2) 通信粗跟踪收发子系统可发射 800 nm 波段信标光,对不确定区域螺旋扫描;接收对方光端机的粗信标光,提供控制信号驱动主反射镜,进行粗跟踪;粗跟踪子系统光轴与主反射镜匹配转动。

(3) 成像与通信(精跟踪)子系统在碎片跟踪的情况下,进行高光全偏振成像;偏振成像波段可选为 400~700 nm;光谱成像波段也选为 400~700 nm;光谱分辨率约 10 nm;口径、焦距、视场视使用环境确定。发射精信标光,并接收对方光端机的精信标光,利用振镜完成精跟踪;碎片信息经信息融合单元处理后调制到通信信号光,发射给对方,完成传输。

### 2.2 工作流程

工作过程流程图如图 3 所示,首先根据导航系统确定被探测碎片空间范围,引导本系统指向碎片;

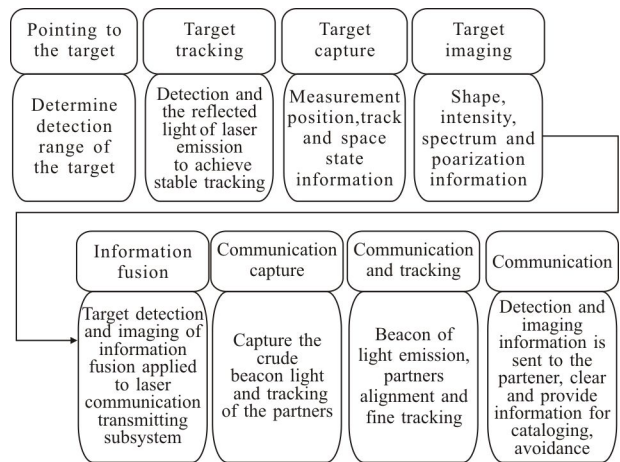


图 3 工作过程流程图

Fig.3 Flow chart of working process

接着由探测与跟踪子系统发射探测与跟踪激光,跟踪 CCD 接收碎片的反射光,实现稳定跟踪;再通过测距探测器测量碎片的位置、轨道、空间状态等信息;然后通过成像单元获得碎片的形状、光强、光谱、偏振等信息;再将碎片探测与成像信息融合,加载到激光通信发射子系统中。根据任务需求,发射粗信标光,对合作方进行捕获与粗跟踪,实现对通信目标的捕获;再通过精跟踪单元发射精信标光,对合作方进行对准与精跟踪;最后将探测与成像信息发送给合作方,为编目、规避、清除提供信息。

### 2.3 技术指标

此系统可达到的技术指标如下。

空间碎片尺寸:  $\leq 20$  cm; 工作距离:  $\geq 50$  km; 成像维度: 强度、偏振、光谱; 通信速率: 优于 2.5 Gbps (误码率优于  $10^{-6}$ ); 通信链路: 卫星、无人机、高空飞艇、地面站之间。

## 3 关键技术

### (1) 空间碎片的稳定跟踪及高精度测距技术

空间碎片尺寸小,距离远,处于高速运动状态,又是非合作目标,必须进行技术突破,实现稳定跟踪和精确测距;

解决途径: 动态光学、轨道预测、伺服控制及相干探测等。

### (2) 偏振光谱强度“三合一”高性能成像技术

光谱成像需要突破短时间内获取高光谱海量数据,偏振成像需要突破目标起偏、偏振传输与探测等问题,必须解决上述技术瓶颈,实现高分辨率高对比度成像。

解决途径: 全偏振宽光谱探测、多维度信息融合及超分辨率成像等。

### (3) 对通信目标的双动态复合跟踪及高速率收发技术

在对空间碎片探测的同时,还需对通信目标进行捕获跟踪,又需高速率发射和高灵敏度接收,必须突破上述技术难题,实现对通信目标的稳定跟踪与高速收发。

解决途径: 两轴协调控制、粗精复合跟踪、激光高速调制及低误码率接收等。

### (4) 多功能集成化光学系统设计与装调技术

在保证各支路的技术指标前提下,还需保证整

机轻小型和多支路间光轴高度平行,必须突破这一技术难题,实现测距、成像、通信的高质量。

解决途径: 高效分光、消杂光、轻量化及光轴平行性检测等。

### (5) 超衍射极限成像和高分辨率成像技术

在较远距离下实现小尺寸碎片的探测,必须突破要突破衍射极限成像和器件空间分辨率的难题,实现小目标的探测与成像。

解决途径: 多维信息、光瞳滤波、亚像元细分、超分辨重建等。

## 4 可行性分析

### 4.1 激光测距能量分析

在脉冲法激光测距中,对漫反射小目标进行计算,接收的信号功率  $P_r$  为<sup>[10]</sup>:

$$P_r = P_t \cdot \frac{A_r \cdot \delta \cdot \rho \cdot \cos \phi}{\theta_t^2 \cdot R^4} \cdot T_t \cdot T_r \cdot T_a$$

式中:  $P_t$  为发射单元的发射功率;  $\delta$  为目标反射截面;  $A_r$  为探测器接收口径面积;  $\rho$  为目标反射效率;  $\phi$  为目标反射法线与发射光束之间的夹角;  $\theta_t$  为测距光束发散角,取  $10 \mu\text{rad}$ ;  $T_t$  为发射光学系统的透过率,取 0.5;  $T_r$  为接收光学系统透过率,取 0.5;  $T_a$  为大气透过率,由于是太空环境取  $T_a=1$ 。

设探测器最低探测功率为  $10^{-7}$  W,将数值代入上式进行计算,探测器能够响应空间碎片反射测距光时,所需要发出测距光束的最大峰值功率如表 1 所示。当口径为 350 mm,探测 200 km 处 15 cm 的碎片需要发射测距激光最大峰值功率为百兆瓦量级。

表 1 激光测距所需的最大峰值功率

Tab.1 Required maximum peak power for laser ranging

Receiving aperture	$D=500$ mm	$D=350$ mm
15 cm/200 km	$P_t=4.612 \times 10^7$ W	$P_t=9.8 \times 10^8$ W

### 4.2 成像探测能量分析

天文探测一般以星等来衡量目标能量是否满足探测要求,空间碎片的探测星等公式如下<sup>[11]</sup>:

$$M_v = -26.73 - 2.5 \log_{10}(E/E_0)$$

式中: 太阳为参考星,其亮度为  $E_0$ ;  $E$  为空间碎片的照度。将空间碎片分割,每一个碎片微面元  $dA$  在探

测器处所产生的照度为:

$$E_{dA} = \frac{1}{\pi R^2} \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA \int \sigma(\lambda) T_a E(\lambda) d\lambda$$

式中:  $E(\lambda)$  为太阳的光谱辐照度;  $\sigma(\lambda)$  为空间碎片表面反射系数;  $R$  为碎片与探测器之间距离;  $T_a$  为大气透过率;  $\theta_1$  为碎片微面元的法线方向与太阳光方向的夹角;  $\theta_2$  为碎片微面元的法线方向与观测方向的夹角。假设  $\sigma$  与  $\lambda$  无关,  $\sigma(\lambda) = \sigma$ , 且  $E_0 = \int T_a E(\lambda) d\lambda$ , 对碎片的整个表面积分, 则碎片到探测器的照度为:

$$E = \frac{\sigma E_0}{\pi R^2} \iint \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA$$

则空间碎片相对于探测器的等效星等为:

$$M_v = -26.73 - 2.5 \log_{10} \left( \frac{\sigma}{\pi R^2} \iint \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA \right)$$

设  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  时, 在 200 km 处和 50 km 处碎片的星等与碎片大小之间的关系如图 4 所示, 图中, 在 200 km 处 15 cm 碎片的星等为 8.964 8。

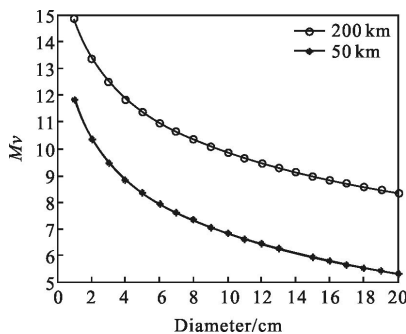


图 4 碎片星等与碎片大小的关系

Fig.4 Relation between the magnitude and the size of space debris

探测器的极限星等与信噪比有关, 计算公式如下式<sup>[19]</sup>:

$$\frac{S}{N} = \frac{S\beta}{\sqrt{S\beta + \sigma_{sky} N^2 + \sigma_{dark} N^2 + \sigma_{read}^2}}$$

由于天基探测, 可以忽略天光影响和暗流效应等。当信噪比大于 3 时, 一般探测器极限星等与像元数之间的关系如表 2 所示。结果表明在 200 km 处探测 15 cm 的空间碎片能量满足要求。

针对空间碎片的探测指标不仅能量要满足要求, 而且成像衍射极限分辨率和器件空间分辨率也要满足要求。

表 2 探测器极限星等与像元数之间的关系

Tab.2 Relationship between the limiting magnitude and the number of pixel detector

Detection level	Detection	Recognition	Identification
Pixel number	2×2	8×8	13×13
Limiting magnitude	9	7	6

光学系统的衍射极限分辨率为:

$$\theta = \frac{2.44\lambda}{D}$$

式中:  $\lambda$  为中心波长, 取  $0.55 \mu\text{m}$ ;  $D$  为光学系统口径。

光学系统的空间分辨率为:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{f} \cdot R$$

式中:  $\delta x$  为光学系统空间分辨率;  $\Delta x$  为像素大小, 取  $10 \mu\text{m}$ ;  $f$  为焦距;  $R$  为成像距离。在 200 mm,  $D=350 \text{ mm}$  时, 当焦距  $f=5000 \text{ mm}$ , 能分辨 15 cm 的碎片, 但是衍射极限分辨率达不到。可采用偏振光谱等多维信息处理、光瞳滤波以期实现超衍射极限成像。

其中光瞳滤波原理的方法如图 5 所示。光瞳滤波技术通过调制改变光瞳函数, 可以实现对点扩散函数(PSF)的控制。光瞳滤波器是由无限窄的同心环带或有限宽的同轴环带组成的, 每个环带具有不同的相或振幅透过率。用一组同心圆环结构的光瞳可以改变光学系统的出瞳函数, 进而控制衍射模式的主瓣大小和旁瓣位置, 实现超分辨。光瞳滤波技术理论上可以得到任意大小的主瓣, 但会伴随着主瓣能量的剧烈减小和旁瓣能量的迅速增加, 因此应用大大受限, 有文献报道超分辨因子  $G$  达到了  $0.64$ <sup>[20-21]</sup>。

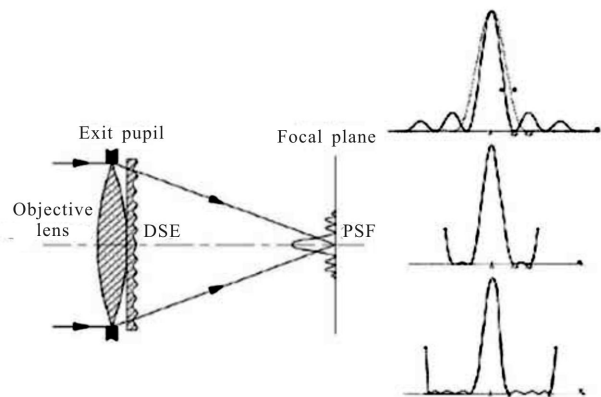


图 5 同心圆环调制出瞳函数实现光学超分辨

Fig.5 Pupil function of concentric circular ring to realize the optical super resolution

### 4.3 激光通信能量分析

激光通信的能量链路传输方程可以用以下的通用表达式描述<sup>[22]</sup>:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_{ot} \cdot L_r \cdot \eta_s \cdot L_{APT} \cdot G_r \cdot \eta_{or} \cdot \eta_{\alpha}$$

式中:  $P_r$  为探测器接收功率;  $P_t$  为发射光源的发射功率;  $G_t$  为发射光学天线增益;  $\eta_{ot}$  为发射光学单元的效率;  $L_r$  为自由空间损耗;  $\eta_s$  为信道引起的功率损失;  $L_{APT}$  为 APT 对准失配引起的功率损耗;  $G_r$  为接收光学天线增益;  $\eta_{or}$  为接收光学系统效率;  $\eta_{\alpha}$  为实际束散角与衍射极限角的额外功率损耗。

通信速率为 2.5 Gbps, 采用半导体外调制技术和 EDFA 高功率放大(5 W), 设计时留有 3 dB 以上的裕量, 进一步提高信道适应性。在 BER=10<sup>-6</sup>、2.5 Gbps 时 APD 极限灵敏度为 -30 dBm。接收功率计算表如表 3 所示。由表 3 可知, 当激光通信有效接收口径为 350 mm, 通信发射角 0.2 mrad, 通信距离可达 1 000 km, 满足要求。

表 3 接收功率计算表

Tab.3 Calculation table of received power

System parameter	Parameter	Notes
Communication transmit power	34.7 dBm	3 W laser
Emission optical path loss	-2.22 dB	Transmit optical efficiency is 0.6
Space loss	-55.14 dB	1 000 km, the receiving aperture is 200 mm communication emission angle is 0.2 mrad
Receiving optical path loss	-1.55 dB	Receiving optical efficiency 0.7
Received power of APD	-24.21 dBm	Actual power to detect the arrival of APD
Detection sensitivity of APD	-30 dBm	BER=10 <sup>-6</sup> , 2.5 Gbps, limit sensitivity of APD
Safety margin	5.89 dB	3 dB above margin

## 5 结论

文中在分析已有空间碎片的光学探测技术基础上, 提出了激光测距、偏振光谱成像、激光传输“三合一”技术方案, 并进行了初步的分析; 根据国内外空间碎片探测发展趋势, 以及空间碎片探测与清除需要的紧迫性, 可以预料该技术将在空间碎片探测方

面具有广阔的应用前景, 主要有以下五个方面: (1) 可为空间碎片的识别编目提供信息服务, 为建立空间碎片数据库提供技术基础。(2) 可为卫星及航天器提供空间环境(碎片)预警, 使其能及早采取规避措施; (3) 可为未来 LEO、GEO 轨道空间碎片清除提供信息服务, 既能提供待清除或移除碎片的信息, 又能观测清除的效果; (4) 可用于对某些特殊空间活动的实时监测, 为我国的空间科学研究提供信息服务; (5) 可用于对敌方航天器的实时侦察与监视, 为我军决策层提供信息服务。

### 参考文献:

- [1] Wu Lianda. Orbital and Detection on Space Debris of Man-made [M]. Beijing: Chinese Technology Press, 2011. (in Chinese)  
吴连大. 人造卫星的空间碎片的轨道和探测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
- [2] Kervin P W, Africano J L, Sydney P F, et al. Small satellite characterization technologies applied to orbital debris [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 35: 1214-1225.
- [3] Bradley M Ratli. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data [C]//SPIE, 2011, 8160: 816002.
- [4] Wang Guoyu. Analysis of the international consultation mechanism for space debris and its development [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32 (2): 147-149. (in Chinese)  
王国语. 空间碎片国际机制发展趋势分析[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(2): 147-149.
- [5] Kocak D M. A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. *MTS Journal*, 2008(42): 52-67.
- [6] Einav N, Sarit S, Schechner Y Y. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement [J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 472-493.
- [7] Miles Q Topping, Joel E Pfeiffer, Andrew W Sparks, et al. Advanced airborne hyperspectral imaging system(AAHIS)[C]//SPIE, 2002, 4816: 1-11.
- [8] Tang Yijun, Jiang XiaoJun, Wei Jianyan, et al. Review of optical observations of high apogee space debris [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1094-1097. (in Chinese)  
唐轶峻, 姜晓军, 魏建彦, 等. 高轨空间碎片光电观测技术综述[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1094-1097.
- [9] Sellar R G, Rafert J B. Effects of aberrations on spatially

- modulated Fourier transform spectrometers [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(9): 3087–3092.
- [10] Smith W H, Hammer P D. Digital array scanned interferometer: sensors and results[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(16): 2902–2909.
- [11] Hammer P D, Johnson L F, Strawa A W, et al. Surface reflectance mapping using interferometric spectral imagery from a remotely piloted aircraft [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2499–2506.
- [12] Lucey P G, Horton K A, Williams T J, et al. SMIFTS: a cryogenically cooled, spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer[C]//SPIE, 1993, 1937: 130–141.
- [13] Jiao Jianchao, Zheng Guoxian, Su Yun. Space debris detection and removal based on space station platform [J]. *Space International*, 2015(4): 53–56. (in Chinese)  
焦建超, 郑国宪, 苏云. 基于空间站平台的空间碎片探测与清除技术[J]. *国际太空*, 2015(4): 53–56.
- [14] Wang Hu, Luo Jianjun. Optical system design of multi-spectral camera for space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1188–1189. (in Chinese)  
王虎, 罗建军. 空间碎片多光谱探测相机光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1188–1189.
- [15] Jin Xiaolong, Tang Yijun, Sui Chenghua. A review on the acquisition and analysis methods of spectral characteristics of space debris [J]. *Chin J Space Sci*, 2014 (1): 95–98. (in Chinese)  
金小龙, 唐轶峻, 隋成华. 空间碎片光谱特性获取与分析方法研究[J]. *空间科学学报*, 2014(1): 95–98.
- [16] Sun Rongyu. Research on optical observation for space debris [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2015, 56: 90–93. (in Chinese)  
孙荣煜. 空间碎片光学观测中若干问题研究 [J]. *天文学报*, 2015, 56: 90–93.
- [17] Jiang Huilinn, Jiang Lun, Fu Qiang, et al. The discussion of the polarization spectral imaging observations technology with space debris [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015(3): 272–277. (in Chinese)  
姜会林, 江轮, 付强, 等. 空间碎片偏振光谱成像探测技术研究[J]. *深空探测学报*, 2015(3): 272–277.
- [18] Feng Qibo. Optical Measurement Technology and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 143–146. (in Chinese)  
冯其波. 光学测量技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 143–146.
- [19] Lan Chaozhen. Analysis of space-based optical observation system modeling and detection ability [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2009. (in Chinese)  
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.
- [20] Zha Weiyi. Imaging principle and technologies of the super-resolving optical system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)  
查为懿. 超分辨光学系统成像原理与技术 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [21] Yang Xuefeng. Research on super-resolution reconstruction technology in frequency and spatial domain for demote sensing images [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)  
杨学峰. 遥感图象频域和空域超分辨重建技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [22] Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 82. (in Chinese)  
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 82.