

# 空间碎片偏振光谱成像探测技术研究

姜会林, 江伦, 付强, 董科研

(长春理工大学 空地激光通信国防重点学科实验室, 长春 130022)

**摘要:**随着太空探索活动的逐年增多,人类对空间碎片的探测显得越发重要。文章首先介绍了探测空间碎片的意义及其常规的光电探测方法,并分析了探测空间碎片的主要难点;在此基础上,结合空间碎片的具体特征,提出一种对空间碎片进行探测与识别的新方法,即将成像、光谱、偏振三个光学基本量同时使用,通过多元特征融合等识别技术,实现对空间暗、弱、小碎片的高效探测,并对新方法中的关键技术进行了分解和可行性分析。

**关键词:** 空间碎片; 偏振光谱成像; 光电探测

**中图分类号:** V520

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2015)03-0272-06

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2015.03.014

## 0 引言

空间碎片是指宇宙空间中除正常工作的飞行器外所有人造物体,大到卫星残骸,小到发动机点火产生的粉末<sup>[1]</sup>。随着人类探索太空活动的逐年增多,太空中空间碎片数量也呈爆发式增长,空间碎片的存在严重威胁着在轨运行航天器的安全,它们和航天器的碰撞能改变航天器的表面性能,造成表面器件损伤并导致航天器系统故障。1996年7月24日,法国“樱桃色”(Cerise)卫星的重力梯度杆被欧洲“阿里亚”(Ariane)火箭助推器的残片撞断,导致卫星姿态失控。2009年2月11日,俄罗斯废弃的“宇宙2251”军用通信卫星和美国铱卫星公司的“铱33”卫星在西伯利亚上空800 km相撞,这次相撞不仅导致了巨大的经济损失,更重要的是产生了新的碎片,给空间环境带来了新的安全隐患,据统计20%~40%的航天器异常或故障是由空间碎片诱发的。因此,对空间碎片进行监测,及时对其进行定轨预报、识别编目与侦查分析对保障航天活动的安全具有重大意义。

本文在分析目前空间碎片光学探测方法的基础上,针对空间碎片光学探测的技术难点,提出将光强信息、光谱信息、偏振信息融合的三合一探测方法,以对目前的空间碎片光测方法进行有益的补充。

## 1 空间碎片光学探测方法及技术难点

目前空间碎片光学探测主要采用的是基于空间碎片物理特性的探测手段,可分为基于光强信息探测、基于光谱的探测以及基于偏振信息的探测等。

### 1.1 光学探测方法

#### 1) 基于光强信息的探测

空间目标反射太阳光的亮度与目标本身的材质、形状、运动状态以及探测视线与太阳的夹角等因素有密切关系,目标亮度信息中包含有目标本身的参数信息。通过光学望远镜可实现对空间碎片的光强探测,通过长时间大量探测数据的分析,能确定出目标亮度变化的特征曲线,从而确定目标的形状、在轨状态等某些特性<sup>[2]</sup>。如稳定卫星的太阳帆板提供较明亮的反射,随着相位角的降低星等信号也随之减低。而失效的卫星或碎片处于不稳定的翻滚状态,其光流量强度随着相位角的变化,没有增大或减小的长周期趋势,是短周期的无规律变化。这种特性可用于空间目标的工作状态的判定。图1是Rubin 2卫星的几何形状以及反射的光度信号<sup>[3]</sup>。

#### 2) 基于光谱信息的探测

空间目标的光谱测量,实质上是利用光谱仪测量卫星的反射能量随波长的变化。已有研究表明,不同卫星平台的光谱存在差异,可利用光谱对卫星进行分类,同时可利用光谱分析空间碎片的物理属性,根据不同金属和涂料的吸收性特征来确定目标的材料类型。图2所示为美国Maui岛光学探测设备获取的某个正在工作的卫星和火箭残骸的光谱信

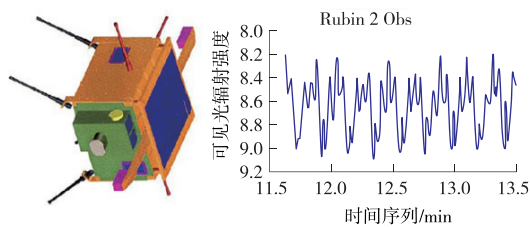


图 1 Rubin 2 卫星的几何形状以及反射的光信号  
Fig. 1 Geometry reflection and optical signals of Rubin 2 satellite

号。从图中看出包含太阳能帆板的目标(如卫星)比没有太阳能帆板的目标(火箭残骸)具有更强的反射能量。利用这个特性,可以区分包含不同材料的目标,从而实现对空间目标的识别。

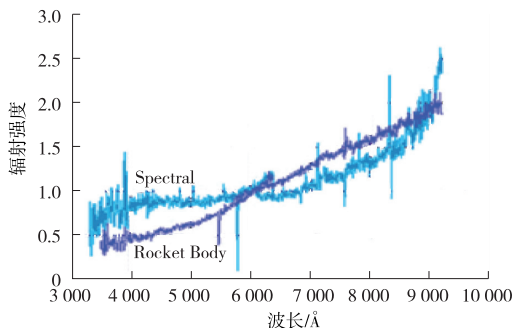


图 2 卫星和火箭残骸的光谱信息<sup>[4]</sup>  
Fig. 2 Spectral information of satellite and the rocket debris<sup>[4]</sup>

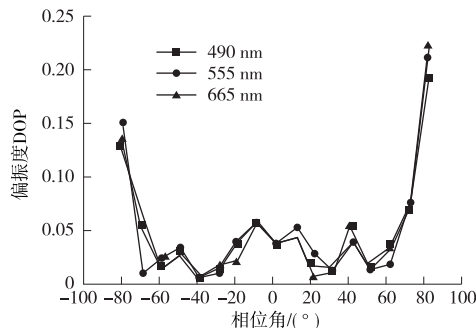
### 3) 基于偏振信息的探测

空间目标反射太阳光的偏振程度较高,任何目标在反射、散射和电磁辐射的过程中,会产生由其自身性质决定的特征偏振。经研究表明,卫星的光学偏振特性与相位角和探测角有关,如图 3 所示,当入射方向和探测方向的相位角在  $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$  时,偏振度达  $13\% \sim 20\%$ ,而在其他相位角条件下,偏振度在  $2\% \sim 7\%$  之间;并且不同位置卫星的光学偏振特性不同,其中太阳能电池板的偏振度最大,在相位角为  $120^{\circ}$  时的偏振度值可高达  $90\%$  以上,这说明空间目标表面的偏振特性对于目标的识别具有很重要的作用。

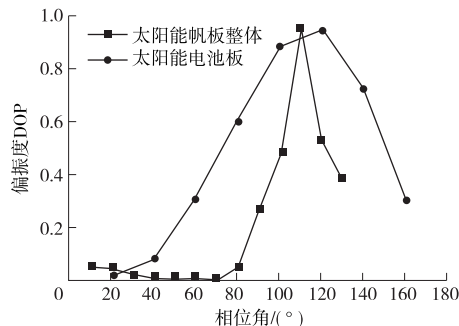
## 1.2 主要技术难点

### 1) 目标暗弱

当空间目标距离探测器超过  $1\ 000\ \text{km}$  时,在图像传感器中的成像仅仅是几个像素的亮点,而光照不足的情况下图像传感器的背景噪声又很显著,这时需要解决的首要问题是如何在运距离探测时,解决目标暗弱带来的光能量不足,导致图像的信噪比和对比度不够的问题。



(a) 490, 555, 665 nm波段的偏振度



(b) 太阳能电池板的偏振度图

图 3 卫星及其太阳能电池板的偏振度图  
Fig. 3 The DOP diagram of satellite and solar panels

### 2) 目标尺寸小

空间碎片一般多为厘米量级,这么小的目标,在远距离探测时空间分辨率低,目前空间点目标探测方法主要集中在解决这种情况下远距离发现目标的问题,即小目标检测的方法。

### 3) 目标运动

空间碎片等目标多属不可控运动,在空间的移动速度很快,瞄准跟踪很难,影响成像清晰度,并且每幅 CCD 图像的图像特性各不相同。因此,在相邻两幅图像中,被识别出的空间目标集合也不尽相同。在 CCD 探测图像序列中实现对运动目标的准确识别和追踪是进行空间碎片监测的基本前提。

## 2 光强、光谱及偏振(光学三合一)探测的技术优势

三合一技术是指将光的强度信息、光谱信息和偏振信息有机组合利用的一种综合光学技术。可实现强度、光谱、偏振成像三个功能,是对传统成像探测的有益补充。其中强度信息反映了探测距离、目标形状以及目标尺寸等;光谱信息反映了空间碎片的材料组份等;偏振信息反映了目标的粗糙度以及与背景的对对比度。将强度、光谱和偏振三维信息联合应用,有助于提高目标探测概率,从而更加有效地

实现对空间碎片的探测。

其中偏振成像具有突显目标提高对比度的优势,2011年美军在白沙靶场开展对空偏振成像目标跟踪试验,采用偏振成像后虚警率由0.52降为0.01,信杂比提高3.4~35.6倍;偏振成像具有辨别真伪提高探测概率的优势<sup>[4]</sup>,2008年,美军对普通光照与阴影中黑色车辆两种成像结果进行对比,躲在阴影中普通强度成像无法探测到的黑色车,偏振成像获得清晰的效果<sup>[5]</sup>;偏振成像具有穿透雾霾提高探测距离的优势,2005年以色列在雾霾环境下进行的偏振成像实验,实验结果表明偏振成像可以提高图像的对比度,提高作用距离<sup>[6]</sup>。而光谱成像能提供目标的二维空间信息和一维光谱信息,不同物体的组成成分不同,其光谱特性一般都具有一定的差异,可通过这种差异就可以实行对目标的识别。2002年,美国海军利用研制的光谱侦察系统,来获取未航行区域的精确信息,包括浅水的深度、海底的构型、水下危险物、海流、潮汐、水的透明度和能见度等信息,取得了很好的探测效果<sup>[7]</sup>。

三合一技术将强度成像、光谱成像、偏振成像功能相结合,同时具有强度、光谱、偏振三者的优势。表1为几种探测技术的优势对比。

表1 几种探测技术的优势对比

Table 1 Advantages compared on several detection technology

探测技术	凸显目标	穿透烟雾	辨别真伪	探测距离
可见光强度成像	较强	弱	弱	较强
红外强度成像	较强	强	弱	强
光谱成像	强	弱	强	较弱
偏振成像	强	较强	强	较弱
光谱偏振强度三合一	强	强	强	强

### 3 光学三合一探测总体方案与关键问题

#### 3.1 总体方案

为了实现对空间目标光谱、偏振、强度信息的探测,拟采用图4所示的探测光路。该光路主要包括前置光学系统、二向色分束器、二维空间光谱获取模块、静态无源偏振成像模块以及光学主动照明系统等部分。目标发出的光先经前置望远系统收集、准直,再通过二向色分束器分为400~700 nm可见光和700~1 100 nm近红外两部分,其中可见光部分透射进入静态无源偏振成像模块进行偏振成像,而

近红外部分则反射进入二维空间光谱获取模块实现感兴趣区域的光谱实时成像。最后所有数据经过软件处理和融合。整个系统采用模块化设计,便于系统的维护安装与后续升级。

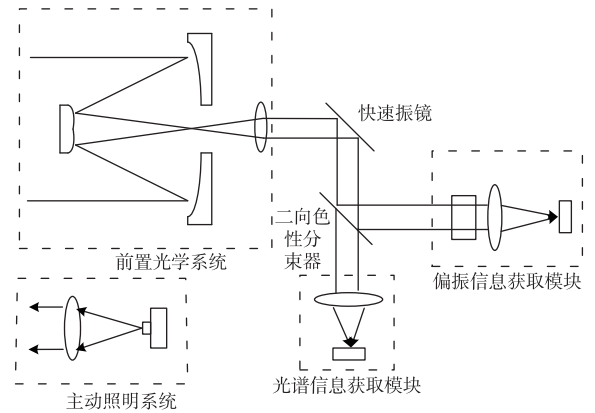


图4 偏振光谱成像系统光路示意图

Fig. 4 System schematic diagram of the polarization spectral imaging

其中系统的相关指标参数初步确定如下:1)偏振成像工作波段: $\lambda_1 = 400 \sim 700 \text{ nm}$ (可见光波段);2)光谱探测波段: $\lambda_2 = 700 \sim 1\ 100 \text{ nm}$ (近红外波段);3)偏振探测精度:2%~5%;4)光谱分辨率:约10 nm。

光学系统的口径、相对孔径、视场角以及空间分辨率可根据具体使用要求来确定。

#### 3.2 三合一探测技术关键问题

1)光谱快速获取:快速完成一定视场空间的光谱成像;

2)静态偏振信息获取:解决空间碎片不同材质与面形的起偏特性、不同信道偏振传输特性、宽波段全偏振动态目标探测等问题;

3)目标光谱、偏振信息融合:实现二维强度信息、一维光谱信息和四维偏振信息高效快速融合,以实现图像的增强并提高隐身微弱目标的探测与识别能力;

4)保偏光学系统设计与装校:考虑光学元器件的偏振特性,减少入射的偏振信息在被提取之前少受光学设计与装校的影响;

5)高精度动态跟踪:实现对空间目标的有效监视跟踪,对新发现目标进行初轨确定,以初轨预测为初始状态,安排后续任务探测,利用获得的新的测量信息实现对其轨道改进或跟踪滤波,获得更为精确的目标状态估计;



6)空间碎片光谱与偏振特性数据库:建立可跟踪、定轨的空间物体光谱、偏振等特征信息数据,为大尺寸空间物体碰撞和预警以及规避提供依据;基于地基和天基监测数据,采用适当的数学方法建立空间碎片的光谱、偏振特性模型,为监测提供数据信息。

## 4 光学三合一技术的可行性分析

### 4.1 国际上认为是发展趋势之一

20 世纪 80 年代中后期到 90 年代早期,国外进行了成像光谱技术与偏振成像技术融合的尝试,实验装置普遍采用旋转滤光片结构,光谱通道数一般小于 10 个,可称作多光谱偏振成像。

2001 年,美国空军实验室研制了液晶型 Sagnac 干涉成像偏振光谱仪,光谱范围 400~800 nm,55 个光谱通道,最好情况为 8 nm(600 nm 波长),能

同时测量目标空间图像、光谱及完整偏振信息,一次完整探测液晶须偏转 4 次<sup>[8]</sup>。2005 年,美国亚利桑那州立大学和美国陆军坦克机动车辆与武器司令部的研究人员提出一种新型实时偏振光谱成像系统,工作波段 400~720 nm,光谱分辨率 10 nm,但图像分辨率很低(空间分辨率)<sup>[9]</sup>。2007 年,欧洲保加利亚学院提出静态无电调控的四探测器分振幅全息光栅型成像光谱偏振实时探测结构,工作波段仅 520~750 nm,光谱分辨率为 7~12 nm。但仪器结构复杂<sup>[10]</sup>。2010 年,美国加州大学提出同轴光路单面阵 CCD 成像光谱偏振实时探测结构,工作波段 400~800 nm,光谱分辨率 4 nm,面阵中 100×100 像素用于成像<sup>[11]</sup>。

国外有代表性的光谱偏振成像研究如表 2 所示。

表 2 国外有代表性的光谱偏振成像研究

Table 2 The typical spectral polarization imaging studies abroad

年份	单位	方法	光谱范围/ $\mu\text{m}$	波段数	光谱分辨率/nm	偏振参量/Stokes	成像分辨率
2001	美国空军实验室	液晶位相调制型	0.4~0.8	55 连续	8	4	
2005	美国亚利桑那州立大学	分孔径型	0.4~0.72	40 连续	10	4	空间分辨域 75×75@2 048×2 048
2007	欧洲保加利亚学院	分振幅全息光栅型	0.52~0.75	25 连续	7~12	4	
2010	美国加州大学	多光栅型	0.4~0.8	—	4	4	空间分辨域 100×100

### 4.2 国内有一定技术基础

我国的偏振成像技术始于 20 世纪 90 年代末,大多针对大气(气溶胶、冰晶云、卷云等)、地物资源、环境保护等领域。例如,安徽光机所研制了偏振辐射度和航空多波段偏振相机,进行大气气溶胶、光学厚度方面研究。上海技物所研制了偏振卷云计,装载于“神舟 3 号”飞船上用于大气卷云、冰晶云探测预报。西北工业大学、西安交通大学、北京航空航天大学、长春理工大学等单位多年来也进行了偏振成像技术研究<sup>[12-16]</sup>,推进了我国偏振成像技术的进步。图 5 为安徽光机所多波段偏振 CCD 相机,



图 5 安徽光机所多波段偏振 CCD 相机  
Fig. 5 The multi-band polarization CCD camera

图 6 为西安交通大学全偏振成像探测装置。

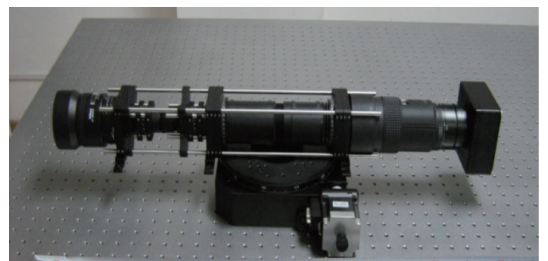


图 6 西安交通大学全偏振成像探测装置  
Fig. 6 Polarization imaging detection device

2011 年,长春理工大学和西安交通大学联合提出了偏振光谱成像技术研究方案,将关键技术分解为光谱快速获取技术、静态偏振信息获取技术、目标光谱/偏振信息融合技术、偏振的光学系统设计与装校、搜索/捕获/跟踪方法等。

2012 年,长春理工大学、安徽光机所、西安交通大学、总装备部测量通信总体研究所、航天 207 所等单位联合,在传统光学成像探测基础上,研究目标起偏、偏振特性传输、全偏振探测的相关基础理论,提出了全偏振宽波段成像探测新方法,以期构建目标/背景起偏模型,典型环境偏振特性传输模型,掌握目

标/背景偏振特性差异规律、典型环境中偏振特性传输规律,揭示全偏振宽波段同时成像机理。

## 5 结束语

本文在分析已有空间碎片的光学探测技术基础上,提出了光强、光谱、偏振三合一技术方案,并进行了初步的分析;根据国内外三合一技术快速发展趋势,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。

### 参 考 文 献

- [1] 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. [Wu L D. Orbital and detection on space debris of man-made[M]. Beijing: Chinese Technology Press, 2011.]
- [2] 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. [Tang T J, Jiang X J, Wei J Y, et al. Review of optical observations of high apogee space debris[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1094 - 1097.]
- [3] 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.
- [4] Ratli B M. Detection and tracking of RC model aircraftin LWIR microgridpolarimeter data [J]. SPIE Proceedings: Polarization Science and Remote Sensing V, 2011 (8106): 1 - 13.
- [5] Kocak D M, A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. MTS Journal, 2008(42): 52 - 67.
- [6] Namer E. Skylesspolarimetric calibration and visibility enhancement[J]. Opt Express, 2009, 17(2): 472 - 493.
- [7] Topping M Q, Pfeiffer J E, Sparks A W, et al. Advanced airborne hyperspectral imaging system(AAHIS)[J]. Proc. of SPIE, 2002(4816): 1 - 11.
- [8] Sellar R G, Rafert J B. Effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometers [J]. Optical Engineering, 1994, 33(9): 3087 - 3092.
- [9] Smith W H, Hammer P D. Digital array scanned interferometer: sensors and results [J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 2902 - 2909.
- [10] 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.
- [11] Lucey P G, Horton K A, Williams T J, et al. Smifits: a cryogenically cooled, spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer[J]. Proc. SPIE, 1993(1937): 130 - 141.
- [12] 焦建超, 郑国宪, 苏云, 等. 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. [Jiao J C, Zheng G X, Su Y, et al. Space debris detection and removal based on space station platform[J]. Space International, 2015(4): 53 - 56.]
- [13] 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(4): 1188 - 1189. [Wang H, Luo J J. Optical system design of multi-spectral camera for space debris [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014 (4): 1188 - 1189.]
- [14] 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. [Jin X L, Tang T J, Sui C H. A review on the acquisition and analysis methods of spectral characteristics of space debris[J]. Chin. J. Space Set., 2014(1): 95 - 98.]
- [15] 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. [Sun R Y. Research on optical observation for space debris[J]. Acta Astronomica Sinica, 2015(56): 90 - 93.]
- [16] 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. [Wang G Y. Analysis of the international consultation mechanism for space debris and its development [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(2): 147 - 149.]

#### 作者简介:

姜会林(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 空间光电技术、光学设计等。

通信地址: 吉林省长春市卫星路 7186 号长春理工大学科技大厦空间光电技术研究所(130022)

电话: (0431)85583354

E-mail: HLjiang@cust.edu.cn

付强(1984—), 通讯作者, 男, 博士, 助研, 主要研究方向: 空间激光通信、激光传输特性方面研究。

E-mail: cust\_fuqiang@163.com

## Discussion of the Polarization Spectral Imaging Observations Technology with Space Debris

JIANG Huilin, JIANG Lun, FU Qiang, DONG Keyan

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

**Abstract:** With human space exploration activities increased year by year, observation of space debris is particularly important. The significance of the observation of space debris and conventional method of photoelectric observation are introduced in this paper, and the main difficulties with the observation of space debris are analyzed. On this basis, according to the specific characteristics of the space debris, a new method for detection and identification of space debris is proposed, which is, three base quantity including imaging, spectrum, polarization are used simultaneously for the effective detection with space dark, weak, little pieces through multiple feature fusion recognition technology. Then, decomposition of the key technologies and feasibility analysis are demonstrated.

**Key words:** space debris; polarization spectral imaging; photoelectric observation

[责任编辑:杨晓燕]