

星载紫外相机空间目标探测能力研究

孙天宇¹, 唐义^{1, 2}, 刘婉玉¹, 卞子煜^{1, 2}, 曾天机¹, 徐文斌³

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 苏州朗晖光电科技有限公司 苏州 215300; 3. 北京环境特性研究所, 北京 100039)

摘要: 卫星在发生由太阳翼导致的季节性闪烁时反射光谱会向短波偏移, 波长更短的紫外段在空间目标太阳翼探测中具有潜在优势。针对空间目标探测, 建立了空间目标探测信噪比和探测距离模型。针对模型中影响最大的材料特性, 测量了典型卫星材料、太阳翼电池材料等紫外和可见光段的光谱反射率, 也分析了模型中探测器和深空背景等其它影响因素。以“实践五号”和“天网5D”卫星为例, 验证了紫外在太阳翼探测上的确存在显著优势。结果表明, 相对于卫星主体可见光探测, 太阳翼紫外探测信噪比增强1.3~1.6倍, 由紫外和可见光复合探测距离可提升1.5~1.8倍。并且紫外在临边、掩星模式下, 以及卫星变轨中发动机尾焰的探测中较可见光具有明显技术优势, 因而紫外探测在空间目标探测中具有明显的费效比和探测能力优势。

关键词: 天基紫外; 紫外探测; 空间目标; 太阳翼; 光谱反射率

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)01-0100-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20220093

引用格式: 孙天宇, 唐义, 刘婉玉, 等. 星载紫外相机空间目标探测能力研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(1): 100-108.

Reference format: SUN T Y, TANG Y, LIU W Y, et al. Research on capability of space target detection by spaceborne ultraviolet cameras[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(1): 100-108.

引言

近年来, 全球空间优势争夺激烈, 空间环境日益恶化, 空间目标探测已成为优先发展领域^[1]。当前在空间目标光学探测领域, 以可见和红外为主要探测波段、以地基为主要探测方法, 对航天器主体进行探测, 探测与识别范围有限。随着对空间目标探测与识别需求的进一步提高, 拓宽探测谱段、获取更多关于航天器的信息成为了必然要求^[2-5]。紫外探测相比于可见光和红外探测具有不可替代的优势: 紫外波段单光子能量高, 能够探测到低亮度信息; 紫外谱段噪声小、特性信息丰富, 方便分类辨识; 紫外空间背景辐射弱, “日盲紫外”段更是提供了天然的均匀地球背景。因此紫外探测可以为空间目标光学探测提供更多维度的信息。另外, 考虑以卫星为探测目标, 太阳翼占据了50%~90%的面积比例(表1), 对可见光有超过95%的吸收率^[6-7]。随着电池效率的不断增加, 可见光在空间目标太阳翼的探测上会变得越来越难以实现, 研究新的波段对太阳翼进行探测可能成为未来的需求。已有的研究表明, 一些用于导航或通信的地球同步卫星在春分或秋分时会因为太阳翼的镜面反

射发生闪烁现象。发生闪烁时, 卫星的可见光波段反射光谱相较于闪烁前后会比较明显的向短波方向移动, 这个现象可以判定是由于太阳翼相对于主体部分的反射特性差异所导致^[8]。此现象表明, 波长更短的紫外可能具有探测可见光成像弱的太阳翼的能力。另外, 太阳翼表面的电池片在可见光波段吸收率很高, 但在紫外波段吸收率呈现下降趋势; 为满足空间抗辐射的应用需求, 电池片表面会覆有抗紫外玻璃盖片, 增强了它在紫外段的反射率^[9]。目前, 国内外已有部分学者进行了空间目标紫外探测的研究。国内, 北京航空航天大学袁艳等^[10]针对空间目标紫外特性提出了一种精确建模方法; 西安电子科技大学白璐等^[11]研究了近紫外到可见光范围内的空间目标光谱散射特性; 国外, Donald Bédard等^[12]在实验室环境下对加拿大小卫星实体进行了不同角度的光谱测量, 覆盖波段350~1 100 nm; 另外, 其又对同种类空间目标材料的BRDF特性进行了测量^[13]。Heather Cowardin等^[14]对泰坦3C的中间级箭体碎片进行了350~2 500 nm的光谱测量。尽管国内外在空间目标紫外探测领域已有一些成果, 但还没有专门研究紫外探测能力的文章。在以往文章中所使用的太阳翼反射率参数上, 精确性也有进一步提

升的空间。因此, 本文基于星载紫外相机研究了空间目标紫外探测能力。首先, 通过空间目标探测建模推导出的信噪比和探测距离的模型; 其次, 测量了常见卫星主体材质的光谱反射率, 重点测量了太阳翼电池片的光谱反射率, 并综合考虑了其它影响空间目标探测的因素; 结合“实践五号”和“天网 5D”两颗典型卫星, 计算并分析了卫星发生闪烁的条件下紫外探测信噪比和极限探测距离与口径的关系, 验证了紫外对于大面积太阳翼的探测优势; 最后, 结合紫外探测特点设计了4种相机在轨工作模式, 将研究理论付诸于现实考虑, 为空间目标紫外探测提出了有效、可行的工程构想。

表 1 典型卫星太阳翼占比

Table 1 Typical satellite solar wings ratio

卫星名称	国别	发射年份	太阳翼占比/%
SkyNet 5D	英国	2007	91
DSCS	美国	1982	83
SJ-5	中国	1999	78
MSX	美国	1996	>50
ORS-5	美国	2017	>50

1 空间目标探测模型

空间目标的紫外探测能力可通过探测信噪比和探测距离描述。空间目标的紫外探测与可见光探测相同, 都是通过探测目标表面反射的太阳光来获取目标物体信息, 可以使用一般的辐射度学建模方法进行研究。对于深空目标, 其紫外背景辐射主要为深空背景辐射, 对探测影响较小。另外, 地球大气吸收了大部分太阳辐射的紫外光, 因此地球反射的太阳辐射对目标紫外特性也几乎没有贡献。以太阳为空间中最主要辐射源, 基于太阳反射光建立空间目标探测模型, 推导空间目标探测的信噪比和探测距离模型。

探测过程中的几何关系如图1所示, 依据辐射度学理论进行分析。图中: n 为目标表面被照射面元的法向量; n' 为相机入瞳面的法向量; n_i 和 n_r 为照射到目标表面的入射光方向和反射光方向; θ_i 、 θ_r 分别为入射光和反射光与目标表面法向量的夹角; φ_i 、 φ_r 分别为入射光和反射光的方位角; θ_d 为探测器光轴与目标物与探测器连线的夹角。根据双向反射分布函数 (BRDF) 定义

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (1)$$

可以得到目标表面某面源在反射方向 n_r 的辐射亮度 L_{dA} 为

$$L_{dA}(\lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \quad (2)$$

其中, $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为太阳在目标表面处的光谱辐照度。因此, 目标在反射方向 n_r 的辐射强度 $I(\lambda)$ 为

$$I(\lambda) = \int_A L_{dA}(\lambda) \cos \theta_r dA \quad (3)$$

得到相机接收到的目标信号辐射通量为 $\Phi(\lambda)$ 为

$$\Phi(\lambda) = \frac{\pi D^2}{4} \times \tau \times \frac{I(\lambda) \cos \theta_d}{d^2} \quad (4)$$

其中: d 为相机与被测目标距离; D 、 τ 分别为光学系统的有效入瞳口径与平均透过率。定义 R 为单位时间产生的光电子数, 则单位时间由目标信号产生的光电子数 R_{signal} 为

$$R_{\text{signal}} = \frac{1}{hc} \int \Phi(\lambda) Q(\lambda) \lambda d\lambda \quad (5)$$

其中: $Q(\lambda)$ 为探测器的量子效率; h 为普朗克常数; c 为光速。以上分析求出了目标信号产生的光电子数, 下面分析探测过程中的噪声因素。噪声主要包括4种: 目标源产生的光子噪声 σ_{source} 、深空背景产生的光子噪声 $\sigma_{\text{background}}$ 、读出噪声 σ_{readout} 、暗电流噪声 σ_{dark} 。设目标在探测器上的弥散斑所占像素数为 n_{pixel} , 可以得到弥散斑区域内的4种噪声为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{source}} = \sqrt{t \times R_{\text{signal}}} \\ \sigma_{\text{background}} = \sqrt{t \times R_{\text{background}}} \\ \sigma_{\text{readout}} = \sqrt{n_{\text{pixel}} \times RN^2} \\ \sigma_{\text{dark}} = \sqrt{n_{\text{pixel}} \times t \times I_{\text{dark}}} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $R_{\text{background}}$ 为单位时间由深空背景产生的光电子数; RN 为单个像素的读出噪声; I_{dark} 为单个像素的暗电流; t 为积分时间。根据信噪比的定义

$$R_{\text{SNR}} = \frac{S_{\text{signal}}}{N_{\text{noise}}} \quad (7)$$

其中, R_{SNR} 表示信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR)。结合式 (1) ~ (7), 整理可求得空间目标探测的信噪比和探测距离 d 为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{t \times R_{\text{signal}}}{\sqrt{t \times R_{\text{signal}} + t \times R_{\text{background}} + n_{\text{pixel}} \times RN^2 + n_{\text{pixel}} \times t \times I_{\text{dark}}}} \quad (8)$$

$$d = \left[\frac{\pi \int E_{\text{sun}}(\lambda) \iint f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \theta_d dA \times \tau(\lambda) Q(\lambda) \lambda d\lambda \times D^2 t}{2hc(R_{\text{SNR}}^2 + R_{\text{SNR}} \sqrt{R_{\text{SNR}}^2 + t \times R_{\text{background}} + n_{\text{pixel}} \times RN^2 + n_{\text{pixel}} \times I_{\text{dark}} \times t})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

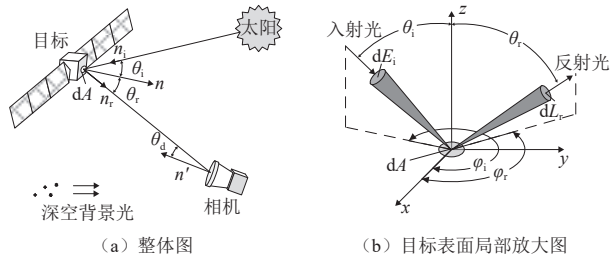


图1 天基光学探测几何关系图

Fig. 1 Geometry of space-based optical detection

综上, 给定目标的材料特性、背景特性、探测角度及探测器的性能参数等, 便可计算目标探测信噪比和探测距离。

2 空间目标探测影响因素及紫外探测能力分析

2.1 典型卫星材质光谱反射率测量

目标的材料特性是影响探测能力最重要的因素之一。国内外通常采用BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 这一概念对不同材质建模, 可以较为真实地描述物体表面的反射特性。现有BRDF模型包括Davies模型、Torrance-Sparrow模型、Cook-Torrance模型、高次余弦散射模型等^[15-16]。本文使用高次余弦散射模型, 通过采用不同的余弦次数描述太阳翼及卫星主体材料的反射特性。设定叠层电池的余弦次数为20, 聚酰亚胺包层的余弦次数为3, 电池单体和白漆的余弦次数为1。高次余弦散射的表达式见式(10)。

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{(n+1)\rho(\lambda)\cos\theta_i\cos^n\theta}{2\pi(2-\sin^{n+1}\theta_i-\cos^{n+1}\theta_i)\cos\theta_r}, \varphi_r, \varphi_i \in \mathbb{R} \quad (10)$$

BRDF模型中光谱反射率函数 $\rho(\lambda)$ 对计算结果有重要影响, 国内现有空间目标紫外波段反射率数据基于平均值, 精确度有限; 国外数据限于350 nm以上, 测量范围有待提升。本文对典型空间目标表面250~760 nm的光谱反射率进行地面半实物测量。测量使用的仪器参数见表2。测量原理与试验场景见图2。

表2 测量仪器及参数

Table 2 Measuring instruments and parameters

光谱仪	波段/nm	光谱分辨率/nm
自研紫外成像光谱仪	250~400	<1.5
Photo Research	380~760	4.0

测量方法为特定方向反射率的测量。卫星太阳翼的镜面反射特性决定测量应采取镜面反射测量方法; 太阳翼与太阳光线的夹角很小, 因此固定光源照射和光谱采集角度均为5°。测量时使用氙灯模拟太阳光对

材料进行照明。将光谱仪固定到三脚架上, 调整拍摄角度。维持氙灯的照射角度、紫外光谱仪的拍摄角度不变, 依次对不同的卫星材料板进行拍摄, 采集紫外—可见光谱数据。最后再对漫反射板进行拍摄, 获取光源的数据。在去除光源影响后, 得到目标的相对光谱反射率。以材料的可见光波段绝对反射率数据为参量, 归一化后得到卫星材料从紫外到可见光波段的绝对光谱反射率。

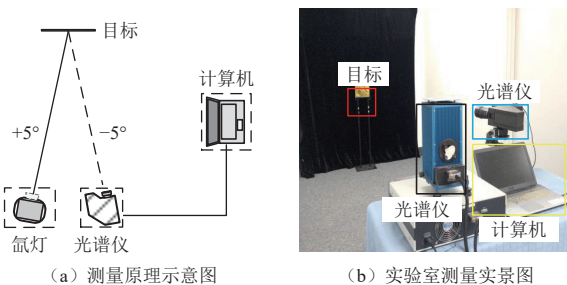


图2 测量原理示意图与实验室测量实景图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement principle and laboratory measurement

卫星按照表面材质可以分为两部分: 主体和太阳翼。主体表面材质以聚酰亚胺包层和白漆为主; 太阳翼表面覆盖着电池片, 材质为砷化镓或硅。所以, 分别测量砷化镓电池片、硅电池片以及聚酰亚胺、白漆在紫外和可见光波段的反射率。3种电池片材料见表3。表中材料依次为硅电池单体 (single solar cell)、三结砷化镓叠层电池 (coverglass interconnect solar cell)、高效率硅叠层电池。电池单体为表面没有抗辐照玻璃盖片的电池片; 叠层电池为表面覆盖抗辐照玻璃盖片的电池片。

3种电池片的反射率测量结果见图3、图4、表4。

表3 3种空间用太阳电池片

Table 3 Three kinds of space solar cells

太阳电池材料	实物图
硅电池单体	
三结砷化镓叠层电池	
高效率硅叠层电池	

根据结果可以得到, 3种电池片都具有强紫外反射、强可见光吸收的特点, 并且250~450 nm几乎包含了电池片高反射率的大部分峰值。因此, 利用这一特点可以在紫外波段对太阳翼进行探测; 另外, 可以将紫外探测波段扩展至450 nm。

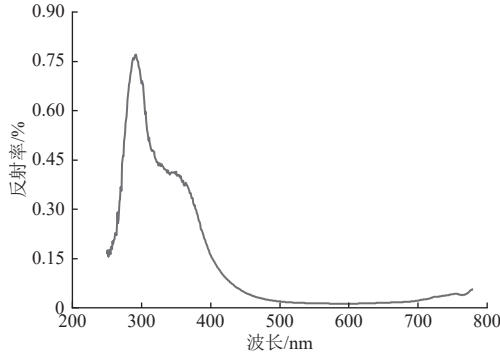


图 3 硅电池单体光谱反射率
Fig. 3 Silicon single solar cell spectral reflectance

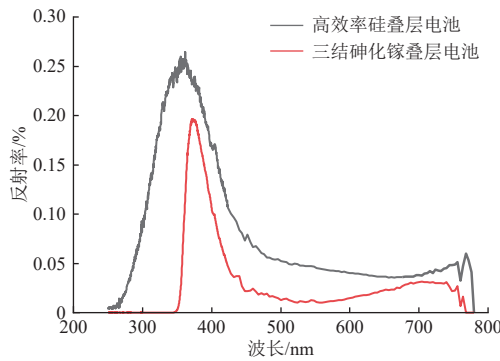


图 4 三结砷化镓叠层电池和高效率硅叠层电池的光谱反射率
Fig. 4 Spectral reflectance of triple junction gallium arsenide coverglass interconnect solar cell and high performance silicon coverglass interconnect solar cell

表 4 3种空间用太阳电池片峰值反射率

Table 4 Peak reflectance for three types of space solar cells

太阳电池材料	峰值波长/nm	峰值/%
硅电池单体	292	77.1
三结砷化镓叠层电池	372	19.6
高效率硅叠层电池	359	25.7

测量3种常见卫星主体材料的反射率, 主体材料见表5。

测量结果如图5、表6所示。结果表明, 3种常见卫星主体材料均表现出反射率在某一波长迅速上升的特征; 在紫外波段, 银色聚酰亚胺包层和白漆的反射率较高, 金色聚酰亚胺包层的反射率很低; 3种材料在紫外波段的反射率均低于可见光波段, 因此使用可见光对主体部分探测优势更加明显, 太阳翼使用紫外探测优势更加显著。

表 5 金色、银色聚酰亚胺包层和白漆

Table 5 Gold and silver polyimide cladding and white paint

主体材料	实物图
金色聚酰亚胺包层	
银色聚酰亚胺包层	
白漆	

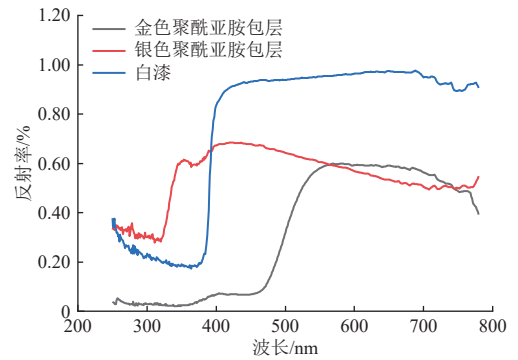


图 5 金色、银色聚酰亚胺包层和白漆的光谱反射率
Fig. 5 Spectral reflectance of gold and silver polyimide cladding and white paint

表 6 金色、银色聚酰亚胺包层和白漆的光谱突变波长

Table 6 Spectral mutation wavelengths of gold and silver polyimide cladding and white paint

主体材料	突变波长/nm
金色聚酰亚胺包层	292
银色聚酰亚胺包层	372
白漆	359

2.2 其它影响因素

除了目标的材料特性会对探测产生影响外, 太阳的辐射能量分布、探测器量子效率以及探测背景等因素也会影响对空间目标的探测, 在分析空间目标的探测能力时需要充分考虑这些影响因素。一般在计算太阳辐照度值时, 习惯将太阳视为理想黑体。根据太阳光谱辐照度数据可以更加准确地计算太阳的影响。ASTM E-490太阳光谱辐照度基于来自卫星, 航天飞机任务, 高空飞机, 火箭探测, 地面太阳望远镜和建模光谱辐照度的数据, 综合光谱辐照度符合空间界接受的太阳常数值, 即 $1\ 366.1\ W/m^2$ 。对ASTM E-490太阳光谱辐照度数据分波段积分计算出250~450 nm的紫外

波段辐照度值为 192.3 W/m^2 , 占太阳总辐照度的14.1%; 450~760 nm的可见光波段辐照度值为 522.8 W/m^2 , 占太阳总辐照度的38.3%。

深空探测的情况下, 深空背景辐射对探测信噪比产生影响。可见光波段的深空背景亮度约为 22 mag/arcsec ^[17-18]。可以认为紫外波段的背景亮度不超过 22 mag/arcsec 。

地球反射的太阳光会对地球的临边、掩星探测产生影响。使用MODTRAN对地球的辐亮度仿真计算, 从空间100 km高度向地面观察, 得到不同波段地球背景的辐射亮度(表7)。由于地球表面的臭氧层对200~280 nm的紫外辐射有强吸收作用, 因此在地表形成的紫外“日盲区”, 利用这一特性可以实现以地球为背景的对地探测。

表7 MODTRAN仿真计算的不同波段地球光谱辐亮度
Table 7 Earth spectral radiance of different bands calculated by MODTRAN simulation

波段/nm	辐亮度/($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
200~300	2.378×10^{-8}
300~400	6.539×10^{-4}
400~760	1.702×10^{-3}

除环境因素外, 相机的光学系统与探测器性能也对紫外探测能力有重要影响。光学系统的重要参数之一是透过率, 目前空间光学系统主要采用大口径反射式系统, 光谱透过率较高, 可以满足紫外探测需求。紫外探测器主要存在两种, 一种是基于光阴极和微通道板的真空光电紫外图像传感器, 另一种是基于半导体光电二极管的全固态图像传感器^[19-20]。sCMOS是目前空间应用中较为先进的探测器, 具有量子效率高、噪声低、动态范围大、分辨率高等优势, 满足空间多光谱探测的需求。本文以Teledyne Technologies的COSMOS-66型号高性能大面阵sCMOS探测器参数为例分析探测器响应, 其紫外段平均量子效率超过50%, 探测器的量子效率曲线如图6所示, 探测器其它参数见表8。

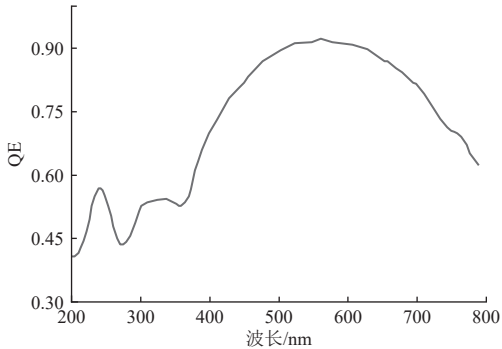


图6 COSMOS-66探测器量子效率曲线

Fig. 6 COSMOS-66 detector quantum efficiency curve

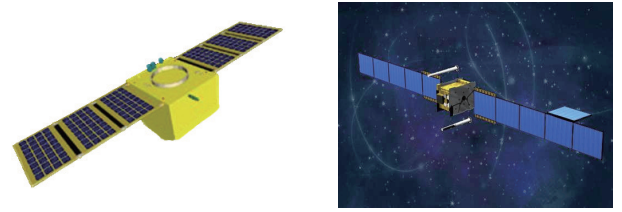
表8 COSMOS-66探测器参数

Table 8 COSMOS-66 detector Parameters

参数	值
像素尺寸/ μm	10×10
分辨率	$8\,120 \times 8\,120$
暗电流/($\text{e}^- \cdot \text{p}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.05
满井容量/ ke^-	>80
读出噪声/ $\text{e}^- \text{rms}$	<1.8
非均匀度/%	<1

2.3 实例计算

本节根据第1、2章建模得到的信噪比和探测距离公式以及探测影响因素, 计算分析星载紫外相机的探测能力。以中国发射的“实践五号”(SJ-5)和英国发射的“天网5D”(Skynet 5D)星体为参考样本进行计算分析, 计算500 km距离下的探测信噪比及在不同光学口径下的极限探测距离(见图7)。“实践五号”与“天网5D”星体均采用双翼太阳能电池阵, 目标星体物性参数见表9。计算使用的探测角度、探测器等其它参数见表10和表11。



(a) 实践五号

(b) 天网5-D

图7 “实践五号”和“天网5D”卫星示意图^[21-22]

Fig. 7 Schematic diagram of SJ-5 and Skynet 5D satellites.

表9 目标星体物性参数

Table 9 Physical property parameters of target satellite

目标	区域	尺寸/mm	材质
SJ-5	主体	$1\,200 \times 1\,100 \times 1\,040$	金色聚酰亚胺包层
	太阳翼	$1\,200 \times 1\,950$	高效率硅叠层电池
Skynet 5D	主体	$3\,700 \times 2\,900 \times 4\,500$	金色聚酰亚胺包层
	太阳翼	$3\,700 \times 15\,000$	三结砷化镓叠层电池

表10 探测角度与探测距离参数

Table 10 Detection angle and detection range parameters

区域	$\theta_d / (^\circ)$	$\theta_r / (^\circ)$	$\varphi_i / (^\circ)$	$\varphi_r / (^\circ)$	$\theta_d / (^\circ)$	距离/km
主体	30	20	0	0	0	500
太阳翼	5	5	0	180	0	500

表11 相机与探测器参数

Table 11 Camera and detector parameters

参数	值
相机口径/mm	140
光学透过率	0.7
探测器型号	COSMOS-66
曝光时间/ms	10

分别对“实践五号”和“天网 5D”两颗卫星仿真计算。通过对比, 得到两颗星太阳翼紫外波段和主体可见光波段探测信噪比的结果如图 8 所示。结果表明, “天网 5D”的太阳翼紫外探测相对于主体可见光探测信噪比提升了 1.6 倍, “实践五号”提升了 1.3 倍, 随着卫星太阳翼面积增大, 紫外探测信噪比也随之显著增加。紫外—可见复合探测情况下, 两颗星的等效探测距离分别增加了 1.8 倍和 1.5 倍。

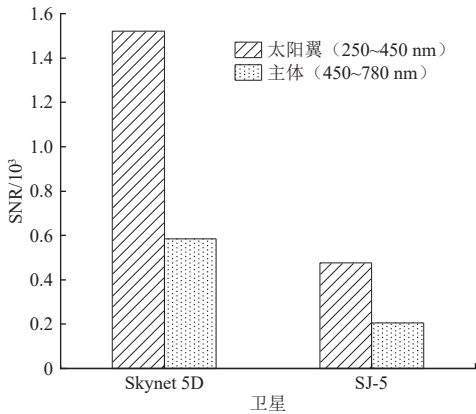


图 8 信噪比计算结果
Fig. 8 Signal-to-noise ratio calculation results

探测距离与信噪比相关, 一般取 4~6 为极限信噪比。这里取 SNR = 5。改变表 11 中的光学系统有效口径, 使之成为自变量在 0.1~0.3m 的范围变化, 计算极限探测距离与相机有效口径的关系。对“实践五号”和“天网 5D”两颗卫星极限探测距离的计算结果如图 9 所示。

结果表明, 探测距离随着口径增大线性增加。并且, 太阳翼面积更大的卫星具有更远的极限探测距离。

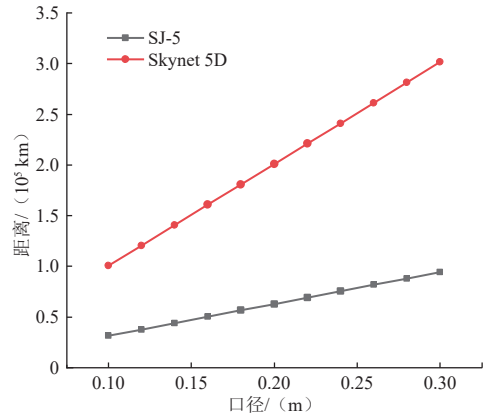


图 9 极限探测距离计算结果
Fig. 9 Calculation results of limit detection range

3 紫外相机在轨工作模式

根据上述卫星数据计算结果, 在卫星发生闪烁的条件下, 紫外探测相对可见光探测具有较高的信噪比, 并且在太阳翼探测上具备优势。本章结合紫外探测在空间目标探测中的特点和空间目标光电探测需求, 对空间目标紫外探测工作模式进行研究, 星载紫外相机在轨工作模式见图 10。为满足高轨空间目标大口径、高分辨率、宽谱段应用需求, 可以采用全反射光路结构、滤光轮加宽谱段探测器的方案。方案 1 的系统组成如图 11 所示。

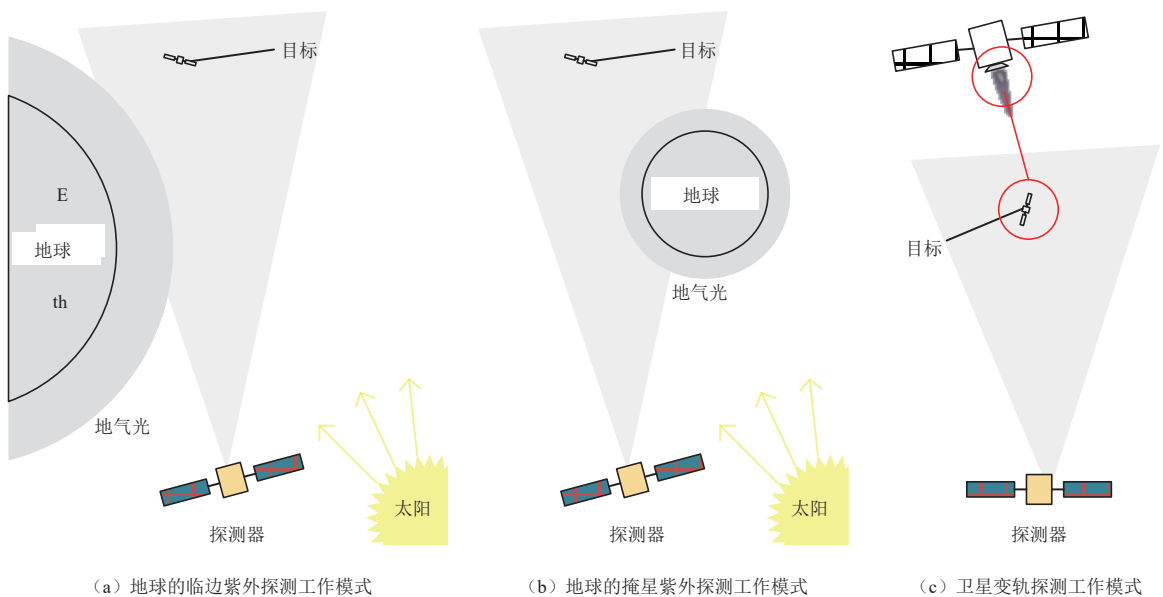


图 10 星载紫外相机在轨工作模式
Fig. 10 On-orbit operation mode of space-based UV camera

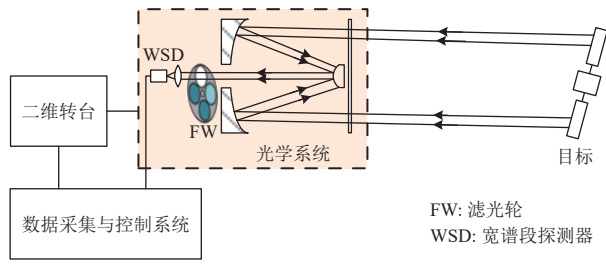


图 11 星载紫外相机在轨工作方案1

Fig. 11 On-orbit working plan 1 of space-based UV camera

整个系统包括光学系统、滤光轮、探测器、二维转台(目标搜索跟踪机构),以及数据采集与控制系统。利用4种不同的滤光片,系统可以工作在4种工作模式下:

1) 深空目标紫外探测工作模式:利用200~450 nm宽波段紫外滤光片,对深空目标进行紫外波段探测。对于一些高轨卫星在春分或秋分发生闪烁,对于其它卫星,当观测位置恰好与太阳入射光形成镜面反射时也可以进行探测。利用近紫外波段对可见光成像弱的太阳翼进行强度成像,实现深空目标的紫外探测,尤其有利于目标太阳翼组成、大小和方向的判断以及材质的分析。

2) 地球的临边、掩星紫外探测工作模式:利用200~280 nm日盲紫外段地球辐亮度均匀,背景噪声小的特点,对目标进行临边探测或掩星探测。考虑该探测条件下一种可能的情况:当目标进入地球背景当中,只需要发现目标而不需要观察目标细节。由于太阳翼的镜面反射占比较大,多数观测角度下难以接收到其反射的太阳光。故此种状况下若以地球为亮背景,航天器将在背景上形成一个暗点,此时可以在较为均匀的亮背景下得到目标暗点;当观测波段为可见光时,由于地球地表的复杂性和不均匀性,亮度分布波动很大,难以实施连续的观测,且观测效果差。因此在此种意义上,紫外探测优于可见光探测。

3) 卫星变轨探测工作模式:利用300~400 nm近紫外滤光片,探测卫星或其它航天器变轨时辐射出的紫外光^[23-24],监测特定目标的在轨行为。

4) 紫外—可见光复合探测工作模式:在无滤光片的状态下,结合可见光波段信息实现更丰富的信息获取能力;或充分利用宽波段探测器的优势,实现更大能量的光入射,达到1.5~1.8倍甚至更远的极限探测距离。

方案1系统在实现4种工作模式的同时,由于紫外和可见光共享望远物镜,在提升探测能力的同时体积和重量不变,其采用了宽波段探测的成像探测器,造价不变;方案2(见图12)具有可见、紫外同时观测的能力。

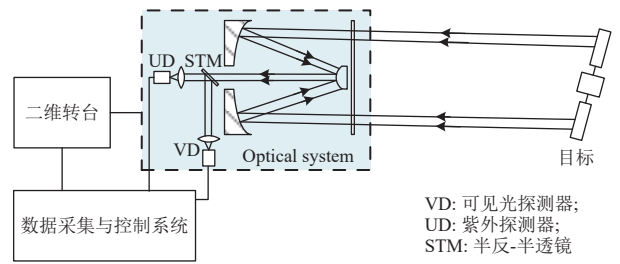


图 12 星载紫外相机在轨工作方案2

Fig. 12 On-orbit working plan 2 of space-based UV camera

4 结论

本文对星载紫外相机空间目标探测能力进行了分析。推导了相机探测信噪比与探测距离模型,通过定量分析与计算,得出了相机的紫外探测信噪比与极限探测距离。在卫星发生闪烁的条件下,信噪比的计算结果表明,由于太阳翼对紫外波段的强反射作用,使得太阳翼紫外波段探测相对于主体可见光波段探测信噪比提升了1.3~1.6倍,复合探测条件下等效探测距离增加了1.5~1.8倍,紫外探测在占有大面积太阳翼的空间目标探测中具有优势。结合紫外探测距离的计算结果,星载紫外相机具备对典型高轨空间目标进行探测的能力。借助地球“日盲”紫外段背景均匀的特点,可以在此波段进行临边、掩星探测,并针对卫星变轨进行有效监测。星载紫外探测系统可以为未来空间目标的探测、搜索与跟踪提供独特的优势,为进一步的空间目标识别奠定基础。

参 考 文 献

- 王兴龙,蔡亚星,陈士明,等. 多源信息融合在空间态势感知领域的应用与发展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 11-20.
WANG X L, CAI Y X, CHEN S M, et al. Application and development of multi-source information fusion in space situational awareness[J]. Spacecraft Recov Remot Sens, 2021, 42(1): 11-20.
- 郑珍珍,朱振才,康一舟. 天基空间碎片可见光观测系统与关键技术发展概述[J/OL]. 光学学报: 1-16[2022-08-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20220722.2121.044.html>.
ZHENG Z Z, ZHU Z C, KANG Y Z. Overview of space-based space debris optical observation systems and key technologies development[J/OL]. Acta Optica Sinica: 1-16[2022-08-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20220722.2121.044.html>.
- 王雪瑶. 国外空间目标探测与识别系统发展现状研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(3): 86-94.
WANG X Y. Development status research of foreign space target detection and identification systems[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(3): 86-94.
- 姜会林,江伦,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(中英文), 2015, 2(3): 272-277.
JIANG H L, JIANG L, FU Q, et al. Research on polarization spectral

- imaging detection technology of space debris[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(3): 272-277.
- [5] 徐融, 赵飞, 周锦松. 空间点目标光谱探测与特征识别研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(2): 333-339.
XU R, ZHAO F, ZHOU J S. Research progress on spectral detection and feature recognition of spatial point targets[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(2): 333-339.
- [6] LIU D P, XIONG L M, MENG H F, et al. Research on outdoor testing of solar modules[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology (AOMATT 2012). Xiamen, China: SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012.
- [7] 王凯, 王训春, 钱斌, 等. 高效太阳能电池及其阵列技术的空间应用研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(5): 1436-1446.
WANG K, WANG X C, QIAN B, et al. Advances in space applications of efficient solar cells and their arrays[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(5): 1436-1446.
- [8] DUNSMORE A N, KEY J A, TUCKER R M, et al. Spectral measurements of geosynchronous satellites during glint season[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2017, 54(2): 349-355.
- [9] 孙希鹏, 杜永超, 肖志斌. 空间三结砷化镓太阳能电池用紫外反射盖片研究[J]. *电源技术*, 2019, 43(9): 1509-1511+1535.
SUN X P, DU Y C, XIAO Z B. Research of ultraviolet reflective coverglass for space triple junction gallium arsenide solar cells[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(9): 1509-1511+1535.
- [10] 袁艳, 孙成明, 黄锋振, 等. 深空背景下空间目标紫外特性建模方法研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 835-842.
YUAN Y, SUN C M, HUANG F Z, et al. Modeling of ultraviolet characteristics of deep space target[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 835-842.
- [11] BAI L, WU Z S, CAO Y H, et al. Spectral scattering characteristics of space target in near-UV to visible bands[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(7): 8515-8524.
- [12] BEDARD D, LEVESQUE M, WALLACE B. Measurement of the photometric and spectral BRDF of small Canadian satellites in a controlled environment[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Maui, Hawaii: Maui Economic Development Board, 2011.
- [13] BEDARD D, WADE G A, Abercromby K. Laboratory characterization of homogeneous spacecraft materials[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 52(4): 1038-1056.
- [14] COWARDIN H, ANZ-MEADOR P, REYES J A. Characterizing GEO Titan IIIC transtage fragmentations using ground-based and telescopic measurements[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference. USA: AMOS, 2017 (JSC-CN-40379).
- [15] 汪夏, 张雅声, 徐灿, 等. 空间目标褶皱材质BRDF建模方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1024001.
WANG X, ZHANG Y S, XU C, et al. Bidirectional reflectance distribution function modeling approach of space objects fold material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1024001.
- [16] 汪洪源, 张伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. *光学学报*, 2008(3): 593-598.
WANG H Y, ZHANG W, WANG Z L. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008(3): 593-598.
- [17] 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. Detection capability analysis of visible light camera for space-based space target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2079-2084.
- [18] 孙成明, 袁艳, 赵飞. 空间目标天基成像探测信噪比分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1654-1659.
SUN C M, YUAN Y, ZHAO F. Analysis of SNR for space-based imaging detection of space object[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1654-1659.
- [19] 罗磊, 唐利斌, 左文彬. 紫外增强图像传感器的研究进展[J]. *红外技术*, 2021, 43(11): 1023-1033.
LUO L, TANG L B, ZUO W B. Research progress in ultraviolet enhanced image sensors[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(11): 1023-1033.
- [20] 张猛蛟, 蔡毅, 江峰, 等. 紫外增强硅基成像探测器进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 19-37.
ZHANG M J, CAI Y, JIANG F, et al. Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 19-37.
- [21] 张炎, 宋战锋. 英国“天网”军用通信卫星系统[J]. *国际太空*, 2009(1): 14-20.
ZHANG Y, SONG Z F. British "Skynet" military communication satellite system[J]. *Space International*, 2009(1): 14-20.
- [22] WOU. 实践五号卫星[EB/OL].[2022-10-19]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%AE%9E%E8%B7%B5%E4%BA%94%E5%8F%B7%E5%8D%AB%E6%98%9F/6304276?fr=aladdin>.
- [23] 国爱燕, 白廷柱, 胡海鹤, 等. 固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 176-183.
GUO A Y, BAI T Z, HU H H, et al. Analysis of ultraviolet radiation characteristics of solid propellant rocket motor exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 176-183.
- [24] 国爱燕, 唐义, 白廷柱, 等. 液体火箭发动机羽烟三维紫外辐射仿真研究[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(4): 410-414.
GUO A Y, TANG Y, BAI T Z, et al. Simulation of 3-D ultraviolet radiation from liquid rocket engine plume[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(4): 410-414.

作者简介:

孙天宇(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 紫外探测应用。

通信地址: 北京理工大学光电学院(100081)

E-mail: 15811475293@163.com

唐义(1977-), 男, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向: 紫外技术、成像光谱、三维激光雷达。本文通信作者。

通信地址: 北京理工大学光电学院(100081)

E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

Research on Capability of Space Target Detection by Spaceborne Ultraviolet Cameras

SUN Tianyu¹, TANG Yi^{1, 2}, LIU Wanyu¹, BIAN Ziyu^{1, 2}, ZENG Tianji¹, XU Wenbin³

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Longrays Photoelectric Technology in Suzhou Co., Ltd., Suzhou 215300, China;

3. Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100039, China)

Abstract: The reflection spectra of satellites are shifted to short wavelengths when seasonal scintillation caused by solar wings occurs, and the shorter wavelength UV band has potential advantages in space target solar wing detection. The space target detection signal-to-noise ratio and detection distance models were developed for space target detection. For the most influential material properties in the model, the spectral reflectance of typical satellite materials and solar wing cell materials in the UV and visible bands were measured, and other influencing factors such as detector and deep space background in the model were also analyzed. Using the SJ-5 and Skynet 5D satellites as examples, it was verified that there was indeed a significant advantage of UV in solar wing detection. The results show that compared with the main body visible detection of the satellite, the solar wing UV detection signal-to-noise ratio is enhanced by 1.3~1.6 times, and the detection distance can be increased by 1.5~1.8 times by the combination of UV and visible light. UV has obvious technical advantages over visible light in detection scenes such as Earth's limb, occultation and engine tail flame detection during satellite deorbiting, thus UV detection has the obvious advantages of cost-efficiency ratio and detection capability in space target detection.

Keywords: space-based ultraviolet; ultraviolet detection; space target; solar wing; spectral reflectance

Highlights:

- A new method of detecting solar wings by ultraviolet band is proposed, which proves that ultraviolet has the an advantage in detecting solar wings.
- The UV hyperspectral reflectance of typical satellite materials was measured, which makes up for the shortage of current ultraviolet band measurement data.
- According to the characteristics of ultraviolet detection, the an on-orbit operation mode of spaceborne camera is innovatively proposed.
- The signal to noise ratio (SNR) and detection range of the solar wing under ultraviolet detection are analyzed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]