

•光电探测•

针对1~10 cm空间碎片的红外与可见光融合探测技术

李宇海, 王 锴

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:空间碎片是航天器正常运行的主要安全隐患。地基观测手段可以对大目标空间碎片进行探测和识别编目,保障航天器运行安全。但对于1~10 cm的微小碎片,主要采用地基光学观测手段。针对微小碎片,结合红外探测和可见光识别两种方式实现微小碎片的远距离探测和识别过程。首先,通过计算给出了红外探测光学系统的设计参数,利用恒星背景和碎片目标的角速度的差别,提出了一种剔除背景的方法。然后,窄视场可见光聚焦观测每个碎片,记录和提取其9个不同角度的角点特征,用于目标识别。通过数值仿真和实验验证,提出的算法可以有效的探测和识别微小碎片。

关键词:空间碎片;红外探测;可见光探测;特征提取

中图分类号:TN215

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-06-0015-05

Fusion Detection Technique of Infrared and Visible Light for Identifying 1~10 cm Space Debris

LI Yu-hai, WANG Kai

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: Space debris is becoming a major potential safety hazard for spacecraft in normal operation. Large space debris can be detected and identified by ground-based observation methods to guarantee the operation safety of the spacecraft. Space-based optical detection method is mainly used to detect small space debris with the size of 1~10 cm. According to small space debris, combining infrared and visible light detection modes, remote detection and identification processes for small space debris are realized. The design parameters of infrared detection optical systems are proposed through calculating. A background elimination method is proposed according to the angular velocity difference between stars in the background and space debris target. And the space debris is observed by narrow field of view visible light focus method to record and extract the corner features of nine different angles to identify targets. Value simulation and experimental demonstration show that the small space debris can be detected and identified by the proposed algorithm effectively.

Key words: space debris; infrared detection; visible light detection; feature extraction

在人类航天环境中,除各类带电离子、场和电磁辐射外,还存在大量空间碎片和微流星体等中性固态物质^[1]。空间碎片是伴随人类航天发射活动而产生的太空垃圾,是系对地球轨道内(高度约200~36 000 km)无任何功能和作用的所有人造物体的统称^[2]。自1957年前苏联发射世界上第一颗人造卫星

Sputnik-1号以来,人类已进行了4 300多次空间发射活动,发射入轨的航天器超过5 500个,这些人造物体绝大多数分布在高度2 000 km以下的低地轨道(LEO)和高度约36 000 km的地球同步区域(GEO)内^[3]。空间碎片主要来源于失效航天器、运载火箭末级箭体和航天器在轨解体碎片等几个方

面,直径范围从1 μm 到数十米不等^[3]。环绕地球的空间碎片大部分分布在近地轨道和同步轨道上,对正常运行的航天器造成了很大威胁。近年来,科学家开始对空间碎片进行监测以确保航天器运行安全。目前,由于探测技术等原因,只能对直径10 cm以上的碎片进行跟踪监测,而10 cm以下的碎片仅仅能够近程预警或者做防护措施^[4]。由于空间碎片的速度很快,在轨道上,撞击的速度一般为10 km/s量级。直径为0.1 mm大小的微粒会引起被撞物体表面的腐蚀,而直径为1 cm大小的微粒会造成严重的损坏,因此,被动的防护措施对1~10 cm大小的碎片撞击防护效果较差^[2],故针对1~10 cm的微小太空碎片的观测和识别是保障目前卫星运行安全的首要问题^[5]。

对于尺寸在1~10 cm之间的空间碎片,地面观测方式受大气和日光等影响,无法精确探测碎片的位置,因此,天基探测是微小碎片探测主要的解决途径。文中主要的思路是首先采用红外大视场进行碎片的捕捉和定位,随后利用小视场的可见光系统进行逐点精细观测记录,最后进行红外和可见光信息融合计算轨道和预判碰撞概率,满足卫星在运行时对微小碎片机动躲避的要求。

预设条件为仅观测同轨道附近高度的空间碎片,观测距离为100~150 km。

1 天基红外探测

天基红外成像探测系统对空间目标的探测效果不仅受碎片自身红外辐射特性影响,而且还受到太空背景红外场景的影响。因此,首先分析空间碎片在太空环境下的红外辐射特性,然后依据其红外特征,进行图像处理和目标筛选,最终确定画面内空间碎片的分布方位。

1.1 空间碎片红外辐射特性

影响空间碎片的红外辐射特性的因素很多,如:太阳辐射、地球反射太阳辐射及地球自身红外辐射等空间轨道外热流,以及碎片表面自身辐射等^[6-7]。为了提高探测精度,规定红外观测时间总在地球阴影范围内,此时碎片的主要红外辐射源是反射地球的红外辐射,且观测背景为恒星和宇宙红外

背景,碎片辨识度较高^[8]。

碎片反射的地球红外辐射主要包括地球反射太阳辐射和地球自身红外辐射两个部分。具体计算如下:

假定地球为漫反射体,对太阳辐射的反射遵守兰贝特定律,并且各处均匀,反射光谱与太阳光谱相同,地球反射率取全球平均反射率0.35^[7],则碎片单元表面吸收的地球反射太阳辐射 Q_{sun} 为

$$Q_{\text{sun}} = \rho_e \cdot S \cdot \alpha_s \cdot \varphi_e \cdot A_j \quad (1)$$

式中, ρ_e 为地球对太阳辐射的平均反射率; S 为太阳辐射常数; α_s 为单元表面太阳吸收率; φ_e 为单元表面地球反射角系数; A_j 为单位表面积。

计算碎片反射地球自身红外辐射时,假定地球几乎处于热平衡,即地球向空间辐射的能量等于它从外部吸收的太阳辐射能量,则单元表面积吸收地球自身红外辐射 Q_{earth} 为

$$Q_{\text{earth}} = (1 - \rho_e) \cdot S \cdot \varepsilon \cdot \varphi_e \cdot A_j / 4 \quad (2)$$

式中, ρ_e 为地球对太阳辐射的平均反射率; S 为太阳辐射常数; ε 为碎片单元表面发射率(假定碎片为漫射体,吸收率等于发射率); φ_e 为单位表面地球自身红外角系数; A_j 为碎片单位表面积。

结合式(1)和式(2),得到碎片在地球阴影区的主要红外辐射能量公式为

$$Q_{\text{Debris}} = Q_{\text{sun}} + Q_{\text{earth}} = (\rho_e \cdot S \cdot \alpha_s \cdot \varphi_e + ((1 - \rho_e) \cdot S \cdot \varepsilon \cdot \varphi_e) / 4) \cdot A_j \quad (3)$$

图1为太阳光谱辐射强度曲线^[10]。

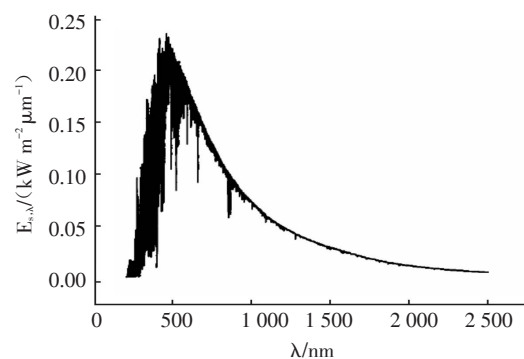


图1 太阳光谱辐射强度曲线

根据图1,太阳辐射为短波辐射,其辐射能量主要集中在短波区,光谱辐射照度的峰值波长在480 nm左右,其中紫外波段约占7%,可见光波段约占46%,红外波段约占47%。现假定碎片为直径10 cm的圆

形材料,厚度1 cm,比热容为常见的微型材料的比热容 $800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,质量1 kg, ε 等于 $0.4^{[11-12]}$,将太阳辐射强度曲线代入式(3)进行计算,得到碎片在地球阴影区的主要红外辐射波段为 $8\sim 12 \mu\text{m}$,辐射强度约等于160 K黑体辐射强度,远高于宇宙背景的3.5 K黑体辐射能量。因此红外可以实现空间碎片的观测,并能在背景中区分出来。

1.2 空间碎片目标识别

空间碎片红外成像需要剔除背景的恒星点。由于太空中绝大多数的目标都是点目标,因此提出背景时主要依靠目标相对观测点运动速度特征来区分。

首先计算同轨道附近空间碎片相对观测点的运动速度。设观测点 S 与空间碎片 T 所在轨道平面为 xoy 平面。 S 轨道高度 $H_s=900 \text{ km}$, T 轨道高度 $H_T=930 \text{ km}$,二者相距 $d=150 \text{ km}$, V_s 、 V_T 分别表示 S 、 T 的速度矢量。 r_s 、 r_T 分别表示 S 、 T 到地心 O 的距离,故

$$\begin{aligned} r_s &= R_E + H_s = 7\,278.217 \text{ km} \\ r_T &= R_E + H_T = 7\,308.317 \text{ km} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, R_E 为地球赤道半径,等于 $6\,378.137 \text{ km}$ 。

观测点与空间碎片的在轨运动速度可由下式求出

$$v = \sqrt{\frac{\mu_E}{r}} \quad (5)$$

式中, μ_E 为地球引力常数,等于 $3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 。

于是,有

$$\begin{aligned} v_s &= \sqrt{\frac{\mu_E}{r_s}} = 7\,400.25 \text{ m/s} \\ v_T &= \sqrt{\frac{\mu_E}{r_T}} = 7\,385.34 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6)$$

根据两者的速度矢量,如图2所示。当观测点(绕地球运动的小卫星)运动到 S' 点,空间碎片运动到了 T' 点(即空间碎片从观测点的视场中心运动到视场边缘),观测点与空间碎片的连线 $S'T'$ 相对于观测点的视轴方向(即 ST)变化了角度 θ (即半视场),此时观测点与空间碎片的距离用 d' 表示。求出与角度 θ 对应的的时间 t ,就可以求出空间碎片在观测点视场中的相对运动角速度 ω 。式(12)中的 T_s 和 T_T 分别是观测点和碎片的运行周期,可根据式(6)运动矢量求得。

$$\alpha = \arccos \frac{r_s^2 + r_T^2 - d^2}{2r_s r_T} \quad (7)$$

$$\gamma = \arccos \frac{r_s^2 + d^2 - r_T^2}{2r_s d} \quad (8)$$

$$d' = r_s \cos(\gamma + \theta) + \sqrt{r_s^2 \cos^2(\gamma + \theta) - (r_s^2 - r_T^2)} \quad (9)$$

$$\xi = \arccos \frac{r_s^2 + r_T^2 - d'^2}{2r_s r_T} \quad (10)$$

$$\varphi = \angle SOS' - \angle TOT' = \alpha - \xi \quad (11)$$

$$t = \frac{\varphi}{360^\circ} \times \frac{T_s T_T}{T_T - T_s} \quad (12)$$

$$\omega = \frac{\theta \times 3\,600}{t} \approx 15^\circ/\text{s} \quad (13)$$

因此在红外序列图像中,搜索角速度在 $10^\circ\sim 20^\circ/\text{s}$ 的运动物体,可以剔除掉大部分的恒定背景干扰物体和恒星星系等无关目标。

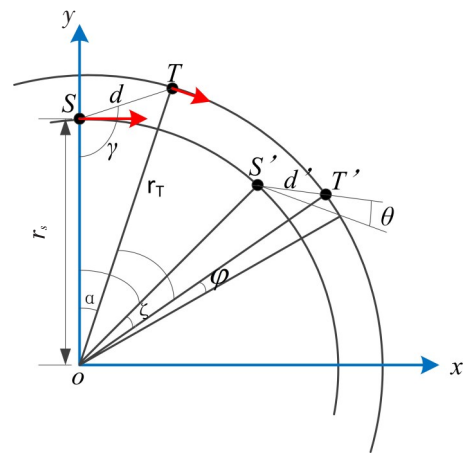


图2 恒星背景下的空间碎片观测

2 天基可见光探测

红外观测结果主要用于空间碎片目标的筛选和定位,其成像主要为点目标,无法辨别形状和大小特征。故在红外图像定位后,采用窄视场光学系统进行远距离逐点观测,记录每个碎片的形状和大小特征,为后续的编目和轨迹分析做准备。

2.1 空间碎片光学特征

空间碎片通常为板状,运动时有一定速度的自旋^[2],其光学的探测图像主要呈现投影面,因此碎片的图像是不断变化的,给识别带来了很大的困难。

结合碎片的自旋运动特性,算法需要连续拍着9幅图像,每幅图像为碎片的一个角度,利用简单的双峰模型进行前景后景分割,得到目标区域。然后,每幅图像均采用Harris算法进行角点计算和特征提取,得到的9组特征点集合便存储为该碎片的特征向量。

由于每次识别目标时,碎片的角度不同,因此需要依次读取碎片的9组特征进行比对。考虑到碎片的光学特征主要是形状特征,该方法支持并行计算,在一定程度上可以优化识别效率,简化光学系统的设计。

2.2 成像探测与识别

对于不同角度的空间碎片,角点大小或相对位置特征是最为明显的特征^[13-14]。主要采用特征角点进行目标识别和模式识别。算法首先利用Harris算法计算得到目标平面投影图的边缘角点,经过聚类算法,得到精简的、稳定的多个角点信息。

碎片多角度二维投影的特征角点的分布便是该碎片的特征图,然后,利用Hausdorff距离进行目标的识别。Hausdorff距离是由Huttenlocher等人提出的算法^[15],用于描述两组点集之间的相似程度,是点集合与集合之间距离的定义形式。因此,如果两个特征角点集合的Hausdorff距离小于一定的阈值,则认为这两个特征角点所代表的碎片是同一个空间碎片。

假定有限点集 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 和 $B=\{b_1, b_2, \dots, b_p\}$, Hausdorff距离计算公式如下

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)]$$

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \cdot \min_{b \in B} \cdot // a - b // \quad (14)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \cdot \min_{a \in A} \cdot // b - a //$$

式中, $H(A, B)$ 是 $h(A, B)$ 、 $h(B, A)$ 中较大的一个, $h(A, B)$ 称为点集 A 到 B 的有向Hausdorff距离,即点集 A 中的每个点 a_i 到 B 集合中与其距离最近的点 b_j 之间的距离。

3 算法数值仿真

利用Matlab软件对算法进行了仿真模拟,实验对象为黑箱中旋转的一个条形碎片。实验碎片为塑料材质,背景为具有漫反射散斑效果的贴纸,模

拟恒星背景^[16]。实际的空间碎片多为铝金属表面,反射率大于塑料材质,因此,实验条件模拟了较恶劣环境下的碎片识别过程。

实验采集原图如图3所示。

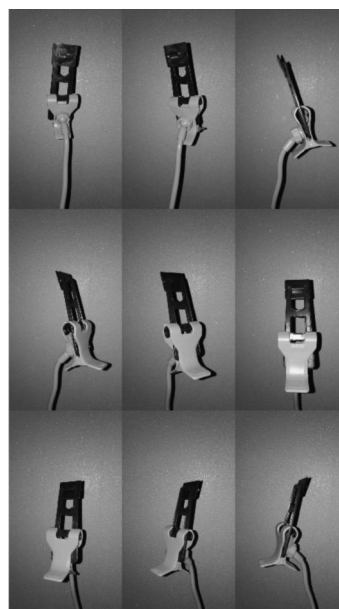


图3 连续拍摄9幅旋转的碎片

计算得到的角点特征图如图4所示。

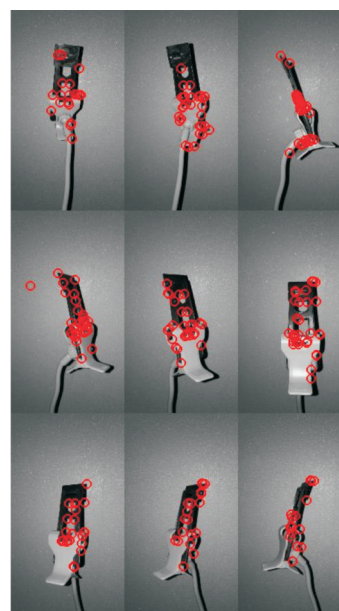


图4 利用9幅图像依次计算Harris角点特征

为了验证算法的识别能力,对实验碎片随意选择角度拍摄一幅图像进行识别,通过计算Test图与9幅特征图之间的Hausdorff距离进行识别,仿真结果如图5所示。

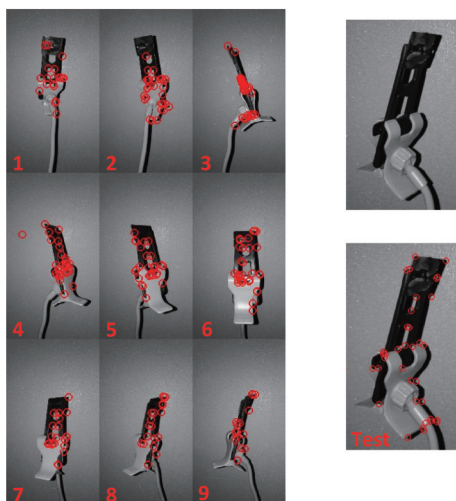


图5 特征图和随意角度目标图像角点特征对比

计算Test图与1~9特征图的特征点集合之间的Hausdorff距离,结果如表1。

表1 Test图像特征点集合与特征图角点集合的Hausdorff距离

特征图	距离	特征图	距离	特征图	距离
1	80.542	4	22.789	7	51.247
2	94.657	5	67.664	8	14.025
3	34.714	6	74.614	9	26.887

Hausdorff距离数值越小,说明两个点集合的平均距离约小,即两个点集合越接近。Hausdorff距离越大,图像的特征点差别越大。因此,算法认为Test图更加接近特征图8。如果设定一个阈值,则可以实现目标的识别。

4 结论

结合红外观测定向算法和可见光特征提取与识别算法两种方式,实现了大范围的、同轨道远程微小空间碎片探测和识别能力,为天基的碎片探测提供了一种技术解决方案,弥补了地基观测的不足。通过实验仿真验证,该方案可以和地基结合,构建一种天地协同观测的空间碎片观测系统,实现1 cm到1 m以上多尺寸碎片的探测和识别,甚至编

目能力,为我国太空探测和空间利用提供安全保障。

参考文献

- [1] Kessler D J. A computer-based orbital debris environment model for spacecraft design and observation in low earth orbit, NASA TM 104825, 1996:3-10.
- [2] ESA Space Debris Mitigation Handbook. European Space Agency, 2003(3):15-22.
- [3] 都亨,张文祥. 空间碎片[M]. 北京:中国宇航出版社, 2007.
- [4] 王海福,冯顺山. 空间碎片导论[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [5] 唐轶峻,姜晓军. 高轨空间碎片光电观测技术综述[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1094-1098.
- [6] 韩玉阁,宣益民. 卫星的红外辐射特征研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 34-37.
- [7] 舒锐,周彦平,陶坤宇,等. 空间目标红外辐射特性研究[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 196-199.
- [8] 唐勇,卢欣,郝云彩. 星敏传感器杂光抑制分析[J]. 航天控制, 2004, 22(3): 58-61.
- [9] 金玉竹. 空间碎片光学探测与识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007, 7.
- [10] 杜俊举. 空间碎片的测光观测与图像处理[D]. 山东: 山东大学, 2015.
- [11] 张伟清. 卫星红外辐射特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [12] 汪洪源,陈赞. 天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 5, 45(5).
- [13] 王向军,王研,李智. 基于特征角点的目标跟踪和快速识别算法研究[J]. 光学学报, 2007, 30(2): 360-364.
- [14] 翟光,赵琪,张景瑞. 空间碎片在轨识别与精确定位方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 5, 45.S1.
- [15] Huttenlocher D P, Rucklidge W J. A multi-resolution technique for comparing images using the Hausdorff distance [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1993:705-706.
- [16] 潘海斌,丛明煜,张伟,等. 航天遥感器的空间目标成像模型研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1699-1702.