

地面紫外探测高空高速再入目标分析与验证

刘火平¹, 尹达一^{2,3}, 张荣杰¹, 房陈岩^{2,3}, 魏传新^{2,3}

¹中国人民解放军 63610 部队, 新疆, 巴音郭楞蒙古自治州 841000;

²中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

³中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 为验证地面紫外探测系统是否能对臭氧层以上的高空高速再入目标探测成像, 分析了高空高速再入目标产生紫外辐射的机理以及进行地面紫外探测的可行性, 并在国内某多用途飞船缩比返回舱实验中, 利用自研紫外光学成像验证设备开展验证实验, 获取了 40 km 以上高空高速再入目标的地面紫外探测图像, 依托地面平台成功获取臭氧层以上高空高速目标紫外图像。实验表明, 在稀薄大气条件下, 高空高速目标可以产生强烈的紫外辐射, 利用地面紫外探测器完全可以实现对高空高速再入目标的探测成像, 并且能够从背景中有效分离和提取成像目标。对于进一步开展空间紫外探测的实际应用研究和深化紫外探测理论具有十分重要的参考价值。

关键词 成像系统; 紫外探测; 再入目标; 空间飞行器; 地面探测

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1211004

Feasibility Analysis and Verification of High Speed Reentry Target on Ground Ultraviolet Detection

Liu Huoping¹, Yin Dayi^{2,3}, Zhang Rongjie¹, Fang Chenyan^{2,3}, Wei Chuanxin^{2,3}

¹63610 PLA Troops, Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture, Xinjiang 841000, China;

²Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract To verify whether the ground ultraviolet detection system can be used to detect the high altitude and high speed reentry targets above the ozone layer, mechanism research of UV radiation caused by high altitude high speed reentry target and feasibility of ground UV detection are studied, and in the return test of the shrunk ratio cabin of a multipurpose spacecraft, an equipment of UV optical imaging is used to carry out the verification test, which obtained above 40 km of high altitude and high speed reentry target surface UV detection image, broke the blank record of ground optical detection which had never get UV image of high-altitude above ozone layer of high speed target. The results show that under the condition of thin atmosphere, the high altitude high speed target can produce strong ultraviolet radiation. And it is feasible to use the ground ultraviolet detector to detect the high altitude high speed reentry target. Moreover, the imaging target can be effectively separated and extracted from the background. It has the important reference value for the further development on practical application and further research on the theory of ultraviolet detection.

Key words imaging systems; ultraviolet detection; reentry target; space vehicle; ground detection

OCIS codes 110.2960; 260.7190; 260.7200; 230.5160; 240.6670

1 引 言

自发现紫外光以来,人们已对其开展了较为广泛的理论与应用研究。自 20 世纪 60 年代初,美国就开始使用地基或空基探测器测量发射飞行器目标的紫外光谱,开展弹道目标的紫外探测研究和观测实验;20 世

收稿日期: 2017-06-16; **收到修改稿日期:** 2017-08-04

作者简介: 刘火平(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事空间目标光学探测跟踪与识别方面的研究。

E-mail: 18509962719@163.com

纪 80 年代以后,以美国为代表的世界先进军事强国,在红外技术相对成熟后,已将研究重点转向紫外光的应用,如紫外探测与预警等方面,并且都已发展到实际应用阶段^[1-3]。

尽管如此,关于紫外探测技术用于空间目标探测的公开资料却较少。在已有的资料中,有关天基平台对于高空运动目标的紫外探测很少,只有少量关于地面平台对于 20 km 以下空中飞行目标的紫外探测资料;地面平台对 30 km 以上高空高速目标的紫外探测成像,大多数资料认为由于臭氧层的阻隔而难以实现。

与欧美发达国家比较,我国的紫外光学技术研究与应用起步相对较晚,主要还停留在各大院校和研究所的理论研究阶段^[4-6]或民用技术的应用阶段^[7-8]。尤其在空间高速飞行目标的紫外探测方面,由于空(天)基平台的缺失及地基平台实验的缺乏,尚无相关报道。

针对上述情况,本文对高空高速再入目标产生紫外辐射的机理与进行地面紫外探测的可行性进行分析,并开展地面紫外探测实验研究,实现了地面平台对高空高速飞行目标的紫外探测,这将有力促进我国对空间目标的紫外探测技术的发展,并对空间高速目标紫外特性研究和空间目标的紫外探测具有十分重要的意义。

2 高空高速飞行目标紫外辐射与探测基本原理分析

2.1 高空高速飞行目标紫外辐射机理

高空再入目标主要包括各种空间飞行器的残骸与碎片等。根据公开资料可知,当飞行器在高空飞行时,只要其飞行空间内有大气粒子的存在,且其飞行速度达到一定量级,则贴近飞行器头部顶端的大气粒子将会发生电离,产生等离子体鞘套现象(即黑障现象),可能衰减或隔断飞行器与外界的无线电信号。由文献[7]可知,空气粒子电离产生电弧放电时,即可发出可被探测的紫外光。当大气粒子电离到产生等离子体鞘套现象时,说明其电离比产生电弧放电时严重得多,因此,当飞行器在高空产生等离子体鞘套现象时,必定也会向外发出紫外辐射。

当飞行器在大气层中以高超声速飞行时,靠近飞行器头部的气体会被大幅度的挤压,越接近飞行器头部表面的气体压缩越厉害;并且飞行器速度越快,气体压缩的也越厉害。因此,贴近飞行器头部表面的局部气体被压缩的粒子浓度非常高,可能有如下两个过程导致某些粒子的能级跃迁并形成激发态,形成非平衡状态的激波层。

1) 高浓度的压缩气体粒子与飞行器头部外表皮发生强烈的碰撞与摩擦,飞行器头部表皮附近及其周围会产生很高的温度,这种高温足以引起飞行器头部表皮的剧烈燃烧甚至解体,并发出强烈的光辐射;虽然现在飞行器头部材料的耐烧蚀性越来越好,飞行器烧蚀至解体的现象越来越少,但燃烧依然存在,光辐射也依然存在,并且飞行器速度越快,摩擦越剧烈,燃烧也越剧烈,光辐射也越强烈;同时这种高温会导致气体粒子的能级跃迁,使得气体粒子电离,并在飞行器头部形成等离子体。气体粒子高温电离使其对外发出能量辐射,主要以包括紫外辐射在内的光辐射的形式存在。

2) 高浓度的压缩气体粒子在高温作用下,发生剧烈的相互碰撞,从而引发并加剧粒子的能级跃迁等复杂的反应过程,这些过程会使气体的热力学性质发生剧烈的改变,从而产生紫外辐射。

激波层内产生的紫外辐射与喷焰紫外辐射比较,由于初始组分比较简单——只有飞行器头部表皮和空气组分(主要是氮气和氧气),所以理论分析可能相对简单些,但是激波层内温度可能更高,所以非平衡现象更加明显。

在高空稀薄大气条件下,当空间飞行器以极高速度飞行时,由于空气分子间距离变大,空间粒子间的碰撞频率下降,所以飞行器的飞行速度至关重要。只有当速度越来越大,并达到或超过某一临界值时,被压缩气体粒子之间,以及与飞行器头部表皮粒子间的相互作用才会产生高温,进而发生能级跃迁等一系列复杂的非平衡化学电离反应,从而产生较强烈的紫外辐射。

图 1 所示为大气层内高速飞行器顶端和高空稀薄大气中高速飞行器顶端的激波层区域内粒子密度示意图。



图 1 高速飞行器顶部激波层区域内粒子密度示意图

Fig. 1 Sketch map of particles density in the top shock layer of high speed aircraft

2.2 高速再入目标地面紫外探测可行性分析

相对于现已广泛应用的红外探测系统而言,紫外探测系统具有许多特殊之处,主要表现为紫外光的大气传输特殊性。

紫外光波长为 10~400 nm,按波长又分可以为长波紫外(近紫外,315~400 nm)、中波紫外(中紫外,280~315 nm)、短波紫外(远紫外,200~280 nm)、超紫外(真空紫外,10~200 nm)。如图 2 所示。

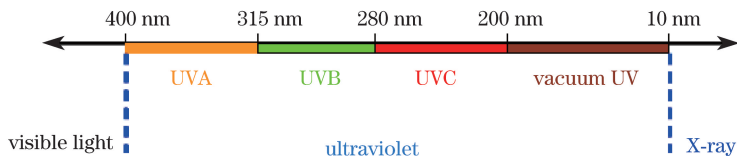


图 2 紫外光分类

Fig. 2 Classification of ultraviolet light

太阳是自然界最大的紫外辐射源,大气层影响其紫外光在近地低空分布的主要因素是氧气分子的吸收和臭氧分子的吸收,以及瑞利散射和气溶胶的吸收^[9]。图 3 给出了太阳光通过大气层吸收后的近地紫外光谱分布实测曲线。

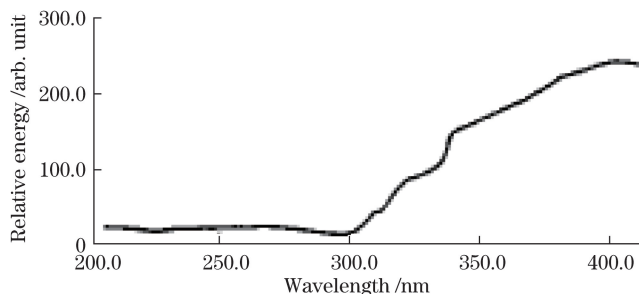


图 3 太阳光近地紫外光谱分布

Fig. 3 Distribution of ultraviolet spectrum of sunlight near the earth

由图 3 可以看出,太阳光谱中波长小于 300 nm 的紫外光到达近地表面时已所剩无几,由文献[4]、文献[9]可知,在通过大气层时,太阳发出的紫外光谱的大气透过率随波长变化而变化:氧气对 200 nm 以下的紫外光波段强烈吸收,臭氧分子对 200 nm~300 nm 紫外光波段强烈吸收。对于空间目标辐射的紫外光,如果要到达地面,与太阳光谱中紫外光一样要受到大气层的强烈作用。由此分析可知,空间目标产生的紫外光辐射在通过大气层后呈以下特点:

- 1) 高空大气层中的氧气强烈吸收空间目标辐射的小于 200 nm 波长的紫外光;
- 2) 高空平流层中的臭氧强烈吸收空间目标辐射的处于 200~300 nm 波长范围的紫外光;
- 3) 空间目标辐射处于 300~400 nm 波长范围的近紫外光通过较多,为地球大气的“紫外窗口”。

对于以高超声速再入大气空间的空间飞行器残骸,飞行轨迹包括从真空到临近空间、再到高空稀薄大气层、再到低空稠密大气层,通常这时飞行器中已没有燃料,所以不再有燃料猛烈燃烧而产生的紫外辐射,这时高速飞行器前端形成的激波层内粒子发生的电离反应会产生紫外辐射;而且越到低空,激波层内的大气粒子越稠密,粒子碰撞频率和概率越大,所以越到低空,紫外辐射越剧烈;但是,越到低空,大气越稠密,大气阻力也越大,这会导致飞行器的速度降低,从而降低离子间碰撞离解的概率,降低紫外辐射强度,所以只有在高空中的某一个合适高度,空气阻力较小而飞行器速度又较大时,产生的紫外辐射最剧烈。这时,如果紫外探测系统的工作波段能够避开大气层吸收最剧烈的紫外波段,而空间目标紫外辐射强度又能大于低空大气粒子的紫外散射强度,则完全有可能在地面实现对空间目标的紫外探测。当然,如果高空高速飞行目标辐射的紫外强度足够大,可以抵消大气层对紫外光的吸收,地面光学探测系统也可能实现对空间目标的紫外探测。

所以空间高速再入目标地面紫外探测系统需要灵敏度高且工作频谱宽的探测器,以适应目标从临近空间到落地前的紫外辐射频谱变化大的特点;或者针对不同再入高度目标,选择不同频谱的紫外探测器。

3 地面紫外探测高空目标初步实验结果与分析

3.1 地面紫外探测高空高速再入目标初步验证实验

为验证地面紫外探测高空高速再入目标的可行性,在西北某实验测站采用国内自主研发的一套紫外光学成像实验验证设备,对某多用途飞船返回舱空间飞行器目标完成了初步的紫外探测验证实验,相关条件及参数如下:1)目标类型,某型号多用途飞船缩比返回舱;2)天气条件,晴朗无云,有轻微浮尘;3)紫外像机为单光谱像机,采用紫外光学+面阵探测器凝视方式工作,光谱范围 250~300 nm。光机主体固定在某大型光学经纬仪上,质量不大于 40 kg,由直流电源供电,通过千兆以太接口将图像数据传输到便携式计算机。

实验中,该紫外光学成像实验验证设备发现了目标,并成功探测成像。由于目标只是从该实验观测站上空飞过,并没有在该站着陆,所以只是跟踪了一段时间,具体成像距离为 70~100 km,飞行高度为 40~60 km,成像时间约 13 s。图 4 为目标紫外探测所成图像。

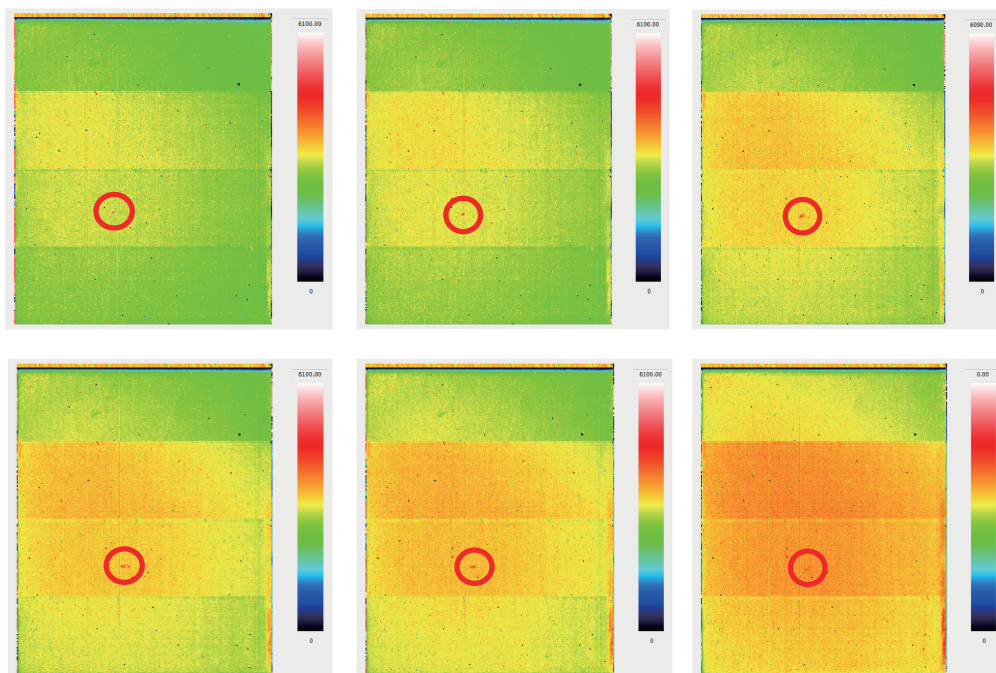


图 4 目标探测成像

Fig. 4 Target detection imaging

3.2 实验图像初步处理

为得到目标更加突出的紫外图像,对图 4 进行初步处理,所用算法主要有:减背景预处理算法、低频噪声滤波算法、图像直方图校正算法、自适应对比度增强(ACE)算法、伪彩色增强显示算法等,均为各图像处理软件中的常用算法。采用 Matlab 编程软件处理后得到的目标二维图像与三维图像分别如图 5、6 所示。

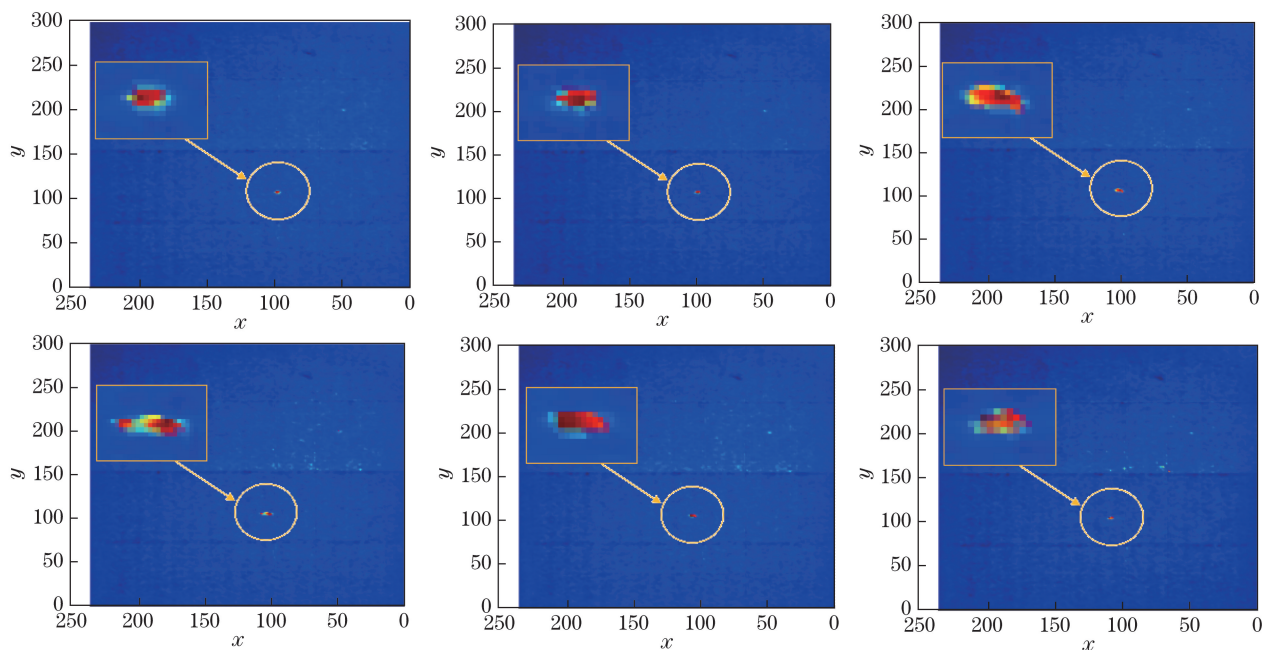


图 5 初步处理后的紫外探测目标二维图像

Fig. 5 Two-dimensional images of UV detection targets after preliminary processing

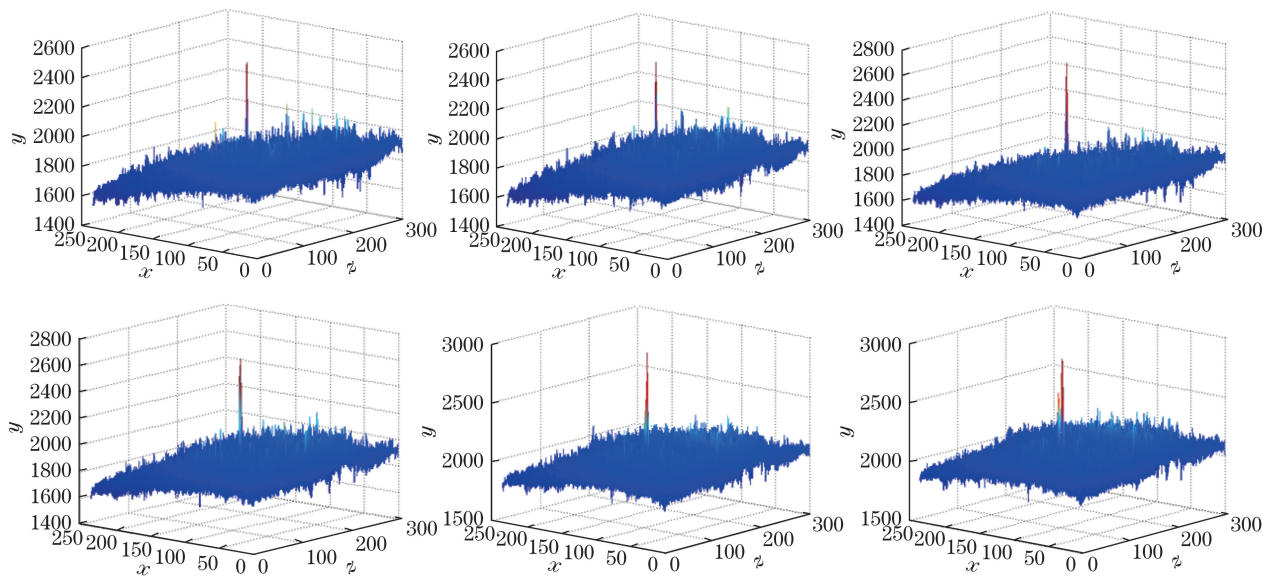


图 6 初步处理后的紫外探测目标三维图像

Fig. 6 Three-dimensional images of UV detection targets after preliminary processing

选图 4 第一幅图像进行处理,计算图像中目标的信噪比。根据目标位置选择像素为 40×40 的全局邻域(图 7),分别选择像素为 5×5 和 7×7 的目标邻域来计算,得到图像的信噪比,计算公式为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{y_1 - y_0}{S_0}, \quad (1)$$

式中 y_1 为目标领域的平均灰度值, y_0 为全局邻域去除目标邻域后的平均灰度值, S_0 是全局邻域去除目标邻域后灰度值的均方差噪声。

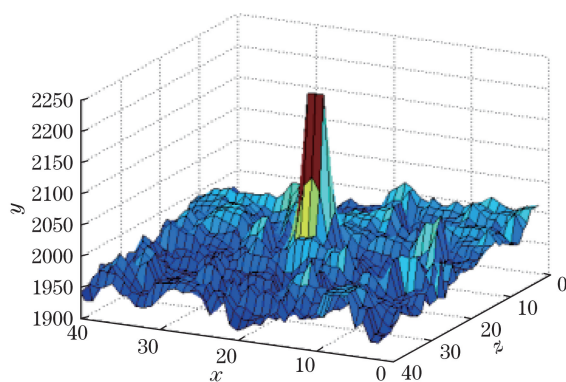


图 7 40×40 的全局邻域图像

Fig. 7 40×40 global neighborhood image

计算可得,选择 5×5 目标邻域(图 8),则图像信噪比为 27.9;选择 7×7 目标邻域(图 9),则图像信噪比为 18.4。

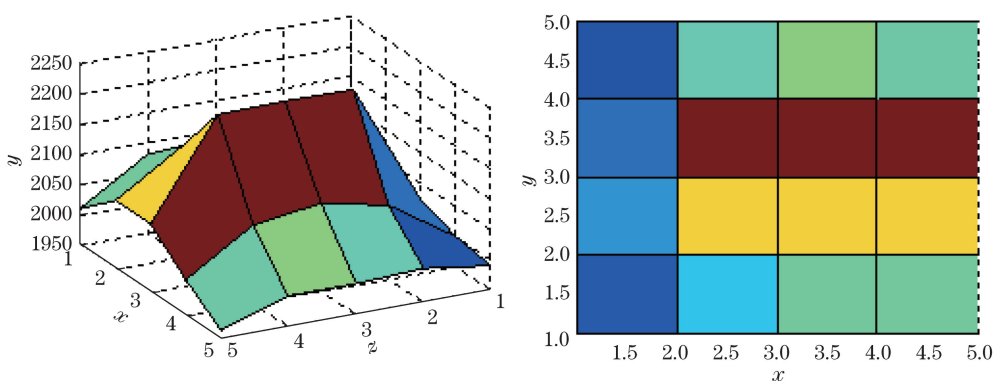


图 8 5×5 邻域图像

Fig. 8 5×5 neighborhood images

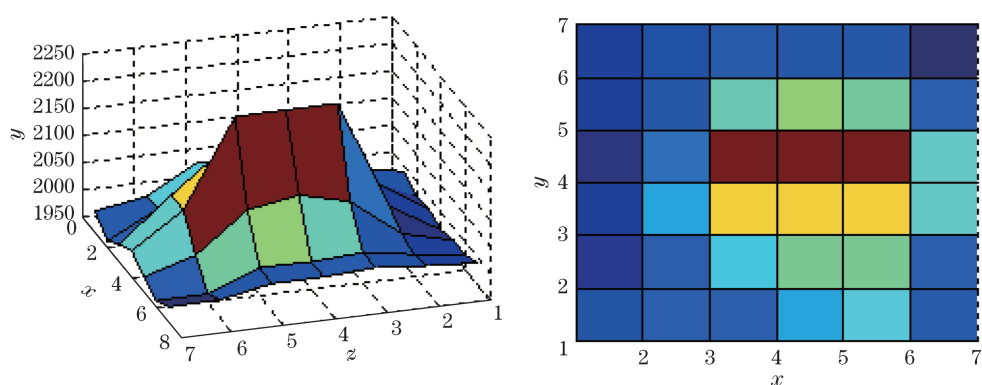


图 9 7×7 邻域图像

Fig. 9 7×7 neighborhood images

经过计算,目标信号与背景杂波之比(即信杂比)为 1.32。结合图 8、9 可知,在图像信噪比大于 10、信杂比达到 1.3 的情况下,目标紫外像与紫外背景灰度相差较大,对比明显,目标能够很容易地从背景中分离并提取出来,为后续的探测目标紫外图像深层次处理和目标紫外特性研究奠定了基础。

3.3 实验结果初步分析

实验中采用的探测器是单光谱紫外像机,其工作波长为 250~300 nm,对应图 2 中短波紫外波段,其大气透过率极低,光谱辐射通量密度极低。因此,实验中被探测到的目标紫外辐射大气透过率极低、光谱辐射通量密度极低,但仍然探测成像,说明这次实验的再入目标所发出的紫外辐射非常强烈。因此,在以后的实

验中,如果避开该波段,高速再入目标所产生的紫外辐射完全可以由地面紫外探测器探测成像。

臭氧层距离地球约 15~25 km,它吸收了来自太阳的大部分紫外线;同样,此次实验成像的目标处于 40 km 以上高空,其辐射的 250 nm~300 nm 波长紫外线也会被臭氧层吸收掉绝大部分;而实验的前一天,该实验场区刚经历过沙尘暴,实验当天天空有浮尘,能见度不佳,对目标紫外光也产生了较大的衰减。所以,实验中能传输到紫外探测器阵列上的紫外光能量只是目标产生紫外辐射的很小一部分。

实验中,紫外探测器与一台红外探测器放置在同一地点,但对于同一个目标,红外探测器所成的目标像大、有拖尾、跟踪时间长;紫外探测器所成的图像小、没有拖尾、跟踪时间短。这可能与大气透过率低、臭氧层吸收、浮尘衰减等原因有关。另外,此次实验中使用的紫外像机口径较小、分辨率还有待进一步提高;再是目标产生的紫外辐射紧贴目标周围,高速飞行目标虽然产生高温尾焰流,但高温尾焰流并未对空气产生非平衡化学反应而电离,未产生紫外辐射,所以紫外探测器所成的图像只是紧贴目标的空气电离层位置产生的紫外辐射,尾焰现象并不明显。

从图 4 还可以看出,目标所成图像的背景较亮,由空间紫外光辐射通过大气层的特点可知,这是低空大气散射太阳光和目标发出的紫外光形成了紫外辐射背景导致的。

本次实验利用地面紫外探测器获取了空间高速飞行目标的紫外图像,填补了地面紫外探测器获取臭氧层以上高空高速飞行器目标紫外图像的空白;同时说明 40 km 以上高空高速飞行器目标可以电离产生紫外辐射;尽管有臭氧层的吸收,但在高空目标紫外辐射相当强时,目标的紫外像完全可以从紫外背景中分离提取出来。

4 结 论

经分析,高空高速飞行器目标在高速飞行和存在大气粒子的条件下,能够产生紫外辐射;对空间目标的地面紫外探测是可行的。实验中利用地面紫外探测器获取了空间高速再入目标的紫外图像;尽管存在臭氧层对紫外光的吸收,但当臭氧层外的高空飞行目标紫外辐射足够强时,即使所用紫外探测器的工作波段与臭氧层吸收紫外波段接近,目标的紫外像仍可以从紫外背景中分离提取出来;由于实验条件限制,本次实验中传输到紫外探测器阵列上的紫外光能量只是目标产生紫外辐射的很小一部分;如果避开日盲区波段,采用较大口径和长焦距紫外探测像机,必将克服该实验的不足,获得更好的探测成像效果。

地面低空紫外探测技术和基于天基或空基平台的对地紫外探测技术已得到比较广泛的应用,但利用地面紫外探测器探测臭氧层外高空飞行器目标却未实现应用。该实验实现了地面紫外探测器对空间高速再入飞行器目标的成像,也表明目标可以从紫外背景图像中分离与提取,这为通过地面探测器实现高空目标的紫外特性研究及紫外探测研究奠定了基础,对促进空间目标紫外探测的系统研究与应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Liu Ju, Jia Honghui, Yin Hongwei. Development of military ultraviolet technology[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(6): 60-64.
刘菊, 贾红辉, 尹红伟. 军用紫外光学技术的发展[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 60-64.
- [2] Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022202.
- [3] Tang Shaofan, Shen Hongbing. The demonstrate of space-based ultra violer (UV) missile precaution and the research of UV precaution detector[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(4): 25-27.
唐绍凡, 沈洪兵. 天基导弹紫外预警及紫外预警探测仪[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(4): 25-27.
- [4] 许强. 军用紫外探测技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 40-49.
- [5] Zhou Wei. The general technology approach research on ultraviolet detecting system of the high-altitude and high-speedtarget[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012: 2-6.
周伟. 高空高速运动目标紫外探测总体技术方法研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012: 2-6.

- [6] Feng Changchun. Modeling study on ultraviolet radiation characteristics of bow shock[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 3-9.
冯苌春. 高速流场中弓形激波的紫外辐射特性建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 3-9.
- [7] 张继军. 高压放电紫外检测技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1-12.
- [8] Han Zhongzhi, Wang Jianhua, Li Yongping, *et al.* Detection method of marine oil spilling and emulsified oil based on hyperspectral imaging under UV induction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0130002.
韩仲志, 万剑华, 李永平, 等. 紫外诱导高光谱成像的海洋溢油及乳化探测方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0130002.
- [9] Xu Feifei, Hu Yong, Yin Qiu, *et al.* Modeling calculation for space-based ultraviolet clutter radiance from different scenes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0601002.
徐菲菲, 胡勇, 尹球, 等. 不同场景的天基紫外背景杂波仿真计算[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0601002.